

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Predikce technických ztrát s ohledem na změny
venkovní teploty u vedení přenosové soustavy**

Prediction of technical losses with respect to
changes of outside temperature at transmission
system

Poděkování

Děkuji panu Doc. Ing. Ladislavu Rudolfovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady v průběhu zpracování diplomové práce.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne

.....
(podpis)

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá predikcí technických ztrát s ohledem na změny venkovní teploty u vedení přenosové soustavy České republiky. V úvodu práce je zpracován teoretický rozbor vedení VVN a ZVN a teorie ztrát elektrické energie u těchto vedení. Pro určení predikce technických ztrát v závislosti na venkovní teplotě jsou využity statistické metody, které jsou v diplomové práci v základní teorii také uvedeny. K účelům výpočtu funkcí závislosti ztrát na venkovní teplotě jsou použity skutečné hodnoty technických ztrát a venkovních teplot, které tvoří zpracovaná databáze naměřených hodnot z energetického dispečinku. Na základě dosažených výsledků predikcí a měřených hodnot elektrických ztrát je provedeno porovnání skutečných měřených ztrát vůči ztrátám predikovaným. Těchto výsledků je následně využito k stanovení vhodných závislostí pro predikci technických ztrát na změny venkovní teploty pro všechna vedení přenosové soustavy. V závěru diplomové práce je provedeno zhodnocení všech dosažených výsledků a navržnutí možností pro využití v praxi.

Klíčová slova:

predikce technických ztrát, přenosová soustava, skutečné hodnoty technických ztrát, venkovní teploty, statistické metody, databáze naměřených hodnot

Abstract

The diploma work concerns a prediction of technical losses with regard to changes of outside temperature at transmission system of the Czech Republic. In the introduction, the high-voltage line and very high-voltage line analysis together with theory of electric energy losses is described. To specify a prediction of technical losses depending on changes of outside temperature, statistics method are used. The methods are mentioned in the basic theory of the diploma work too. Mathematical relations between losses and outside temperature changes are calculated from real measured values which were taken from the database of the long-distance energy control. On the basis of final results given by the prediction and measurements of electrical losses, a comparison between predicted and real values is done. The comparison results lead to a determination of appropriate dependences for a prediction of technical losses with regard to changes of outside temperature at all lines of the transmission system. In the conclusion of the diploma work, an evaluation of all achieved results and proposals for practical usage are summarised.

Key words

prediction of technical losses, transmission system, real values of technical losses, outside temperatures, statistics method, databasys of measured values

Seznam použitých symbolů a zkratek

A, B, C, D		Blondelovy konstanty
Al	-	chemická značka pro hliník
AlFe	-	označení vodivého lana
B _c	[S·km ⁻¹]	susceptance vedení
C	[μF·km ⁻¹]	provozní kapacita uvažované fáze
Cu	-	chemická značka pro měď
ČEPS	-	Česká přenosová soustava
ČR	-	Česká republika
ED	-	energetický dispečink
ES	-	elektrizační soustava
G	[S·km ⁻¹]	konduktance vedení
I ₁	[A]	vstupní proud
I ₂	[A]	výstupní proud
L	[mH·km ⁻¹]	provozní indukčnost
N	[ks]	počet proměnných
P	[W]	ztráty činného výkonu
P ₁	[W]	činný výkon vstupní
P ₂	[W]	činný výkon výstupní
ΔP _k	[kW]	ztráty korónou
ΔP _s	[kW]	ztráty svodem
ΔP _r	[kW]	ztráty rezistencí
PTN	-	přístrojový transformátor napětí
PTP	-	přístrojový transformátor proudu
Q	[C]	úhrn elektrického náboje
R	[Ω]	rezistence
R _v	[Ω·km ⁻¹]	rezistence na kilometr vedení
R _c	[Ω]	výsledná rezistence
R _T	[Ω]	rezistence při stanovené teplotě
R ₂₀	[Ω]	rezistence při 20 °C
S _p	[V·A]	přirozený výkon vedení
S	[mm ²]	průřez vodiče
ΔT	[K]	rozdíl teplot
U ₀	[kV]	počáteční napětí koróny
U ₁	[V]	vstupní napětí
U ₂	[V]	výstupní napětí
U _s	[V]	sdružené napětí
U _f	[kV]	průměrné fázové napětí
VVN	-	velmi vysoké napětí
X _L	[Ω·km ⁻¹]	induktivní reaktance
Y	[S·km ⁻¹]	komplexní příčná admitance vedení
Z	[Ω·km ⁻¹]	komplexní podélná impedance vedení
Z _v	[Ω]	vlnová impedance vedení
ZVN	-	zvlášť vysoké napětí

c	$[\text{km} \cdot \text{s}^{-1}]$	absolutní rychlost
d	$[\text{cm}]$	střední vzdálenost vodičů
f	$[\text{Hz}]$	frekvence
j	$[-]$	imaginární jednotka
k_z	$[-]$	koefficient zatížení
l	$[\text{km}]$	délka vodiče
m_1	$[-]$	vliv povrchu vodiče
m_2	$[-]$	vliv počasí
r	$[\text{cm}]$	poloměr fázového vodiče
x_i	$[-]$	i -tá hodnota
x_n	$[-]$	naměřená hodnota
x_v	$[-]$	vypočítaná hodnota
α	$[\text{K}^{-1}]$	teplotní součinitel odporu
γ	$[\text{km}^{-1}]$	konstanta přenosu
δ	$[-]$	relativní hustota vzduchu
δ_x	$[\%]$	relativní chyba
Φ	$[\text{Wb}]$	magnetický tok
ω	$[\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}]$	úhlová frekvence
λ	$[\text{km}]$	vlnová délka
ρ	$[\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{km}^{-1}]$	měrný odpor vodiče
η	$[\%]$	účinnost

Obsah:

Úvod a cíle diplomové práce	7
1 Teoretický rozbor zařízení přenosové soustavy ČR.....	8
1.1 Elektrárny.....	9
1.2 Elektrické stanice	10
1.3 Vedení přenosové soustavy	13
2 Teorie vedení VVN a ZVN.....	15
2.1 Elektrické parametry vedení	15
2.2 Náhradní schéma vedení [4]	17
2.3 Blondelovy konstanty [2].....	20
2.4 Přirozený výkon vedení [1].....	21
2.5 Ferrantiho jev [4]	21
3 Teorie ztrát elektrické energie	22
3.1 Jouleovy ztráty	24
3.2 Ztráty svodem	25
3.3 Ztráty korónou	26
4 Vybrané statistické pojmy pro řešení predikce technických ztrát u vedení přenosové soustavy	28
4.1 Regresní analýza	28
4.2 Aritmetický průměr.....	28
4.3 Relativní chyba	29
5 Tvorba databází měřených veličin ztrát a teplot pro výpočty predikcí u vedení přenosové soustavy	30
5.1 Schéma sítě a teplotní mapy přenosové soustavy ČR.....	31
5.2 Databáze měřených teplot z energetických objektů.....	32
5.3 Databáze měřených technických ztrát vedení přenosové soustavy	32
5.4 Zpracování datových souborů měřených veličin	34
5.5 Popis upravených datových souborů vedení 400 kV	37
5.6 Popis upravených datových souborů vedení 220 kV	38
6 Stanovení matematických závislostí pro predikci ztrát u vedení přenosové soustavy	40
6.1 Možnosti výběru funkcí pro predikce	40
6.2 Optimální vybraná polynomická funkce.....	43
7 Analýza měřených technických ztrát a ztrát predikovaných	44
7.1 Rozbor predikovaných a skutečných ztrát u vedení 220 kV.....	44
7.2 Rozbor predikovaných a skutečných ztrát u vedení 400 kV.....	48
7.3 Zhodnocení výsledků	52
8 Možnosti využití predikcí technických ztrát v praxi	59
8.1 Odborný software	59
9 Závěr	61
Seznam literatury a odkazů internetu	63
Seznam příloh.....	64

Úvod a cíle diplomové práce

Elektrická energie je v současné době využívána v širokém spektru oblastí lidské činnosti. Její využití pro technické, domácí, ale i zábavní aplikace je neomezené. Není dnes prakticky žádná lidská činnost, která by se bez ní obešla. Pro její nejhospodárnější využití se vyvíjejí nové a úsporné technologie, které dnes nahrazují ty původní. Vzpomeňme významný objev světelného žárovkového zdroje, který je dnes postupně nahrazován např. LED zdroji. Tento pokrok je vázán i v dalších lidských činnostech.

Protože její spotřeba neustále roste a zdroje pro její výrobu nejsou nekonečné, hledají se nové možnosti k jejímu efektivnějšímu aplikování a výrobě. Výroba zahrnuje i cestu energie od zdroje ke konečnému spotřebiteli, kterou nazýváme přenosem nebo distribucí. Ztráty představují část vyrobené elektrické energie, která není zužitkována. Tato diplomová práce se zaměřuje na hledání cesty pro možnost predikce technických ztrát v závislosti na teplotě okolí pro vedení přenosové soustavy. Tento pohled může mít přínos v hledání nových řešení jak ovládat, plánovat její výrobu a distribuci, čímž se mohou snížit ztráty, které jinak mohly být využity pro konání práce. Ztráty lze pouze cíleně snižovat, nikoliv úplně odstranit.

Pro správné pochopení problematiky je v úvodní části proveden rozbor teorie vedení a použitých statistických pojmů. Popsán je postup vytvoření databází, se kterými pracujeme při zkoumání zadaného úkolu. Při hledání závislosti ztrát na teplotě okolí jsou využita data společnosti ČEPS, a.s., která poskytla data teplot objektů a naměřených ztrát na jednotlivých přenosových vedeních České republiky. Závislosti jsou nahrazeny aproximačními křivkami, které slouží jako modely pro budoucí predikci ztrát při očekávané teplotě a je z nich vygenerován matematický tvar funkce. V práci je uveden příklad porovnání skutečných a predikovaných hodnot u konkrétních vedení 220 kV a 400 kV. Uvedeny jsou možnosti návrhu praktického využití s pomocí moderních výpočetních metod na PC.

Seznam cílů diplomové práce:

- zpracování teoretické části
- vytvoření databáze pro generování polynomů závislosti ztrát na teplotě u konkrétních vedení přenosové soustavy
- vyhotovení zkušebních grafů predikčních závislostí ztrát na vedení VVN a ZVN
- porovnání výsledků naměřených a predikovaných Jouleových ztrát
- navržení technických postupů predikce ztrát v praxi

Závěrem práce je provedeno zhodnocení.

1 Teoretický rozbor zařízení přenosové soustavy ČR

Elektrická energie je zušlechtnou formou transformované energie vázané většinou v rudných materiálech. Tato je měněna na tepelnou, která se využitím síly páry mění mechanickým momentem na točivou, jež vytvoří v připojeném alternátoru střídavé elektromagnetické pole. Proměna probíhá v technologicky složitých zařízeních - elektrárnách. Tento ušlechtilý energetický potenciál je možné využít v mnoha lidských činnostech při poměrně malých ztrátách, a stojí za obrovským technologickým pokrokem naší civilizace. Je možné ji jednoduše transformovat v místě spotřeby na jinou formu energie, nejčastěji na světelnou, mechanickou nebo tepelnou. V první kapitole se zaměříme na popis výroby a distribuce elektrické energie.

Elektrická energie má své specifické vlastnosti, kterými jsou [1]:

- *neskladovatelnost*
- *jednoduchost*
- *stejnorodost*

Neskladovatelnost spočívá v nemožnosti elektrickou energii skladovat ve velkých množstvích. Veškerá vyrobená energie je ihned spotřebována. Jednoduchost představuje užití této formy energie pro široké spektrum průmyslových a domácích aplikací. Stejnorodost vyplývá z jednoznačnosti její fyzikální definice kdekoli v celé síti. Její parametry jsou přesně stanoveny z pohledu kvalitativního i kvantitativního.

Elektrizační soustava (ES) je systém elektrických zařízení všech úrovní napětí sloužících k výrobě, přenosu a rozvodu elektrické energie až do místa její spotřeby. Její provoz musí být zároveň bezpečný a spolehlivý. Přenos a rozvod je zajištěn soustavou přenosovou a distribuční, které napájejí odběrné uzly a odběratele přímo, nebo dalšími transformacemi ze sítí nižších napětíových hladin. V této práci se budeme věnovat přenosové soustavě.

Přenosová soustava České republiky slouží k přenosu velkých výkonů mezi hlavními uzly elektrizační soustavy a je charakteristická použitím napětíových hladin 220 kV a 400 kV. Užití těchto napětí je dáno rozlohou zásobovaného území. ES naší republiky nefunguje izolovaně, ale je součástí celoevropského rozvodu elektrické energie. Její další subsystémy jako jsou distribuční soustavy, mají za úkol rozdělit elektrickou energii z napájecího uzlu do jednotlivých skupin nebo oblastí spotřebičů, popř. k jednotlivým spotřebičům. Veřejné rozvodné soustavy slouží k napájení oblastí terciární sféry (byty, občanská výstavba) a jsou z nich napájeny i rozvodné sítě průmyslové, zemědělské a dopravní [1].

Z tohoto pohledu je nutné, aby byly splněny určité požadavky pro její využití. Můžeme je shrnout do těchto základních bodů:

- *bezpečný provoz*
- *provozní spolehlivost*
- *přehlednost, možnost rychlého odstranění poruch*
- *hospodárnost provozu*
- *možnost rozšiřování elektrických rozvodů a jejich modernizace, unifikace jednotlivých částí rozvodu*

Výše uvedený náhled je doplněn dalšími požadavky plynoucími z řešení připojení konkrétních odběrových míst, která je nutno posuzovat individuálně dle místních podmínek. Při technických řešeních připojení odběratelů se přihlíží k stávajícímu zatížení sítě, požadovanému příkonu,

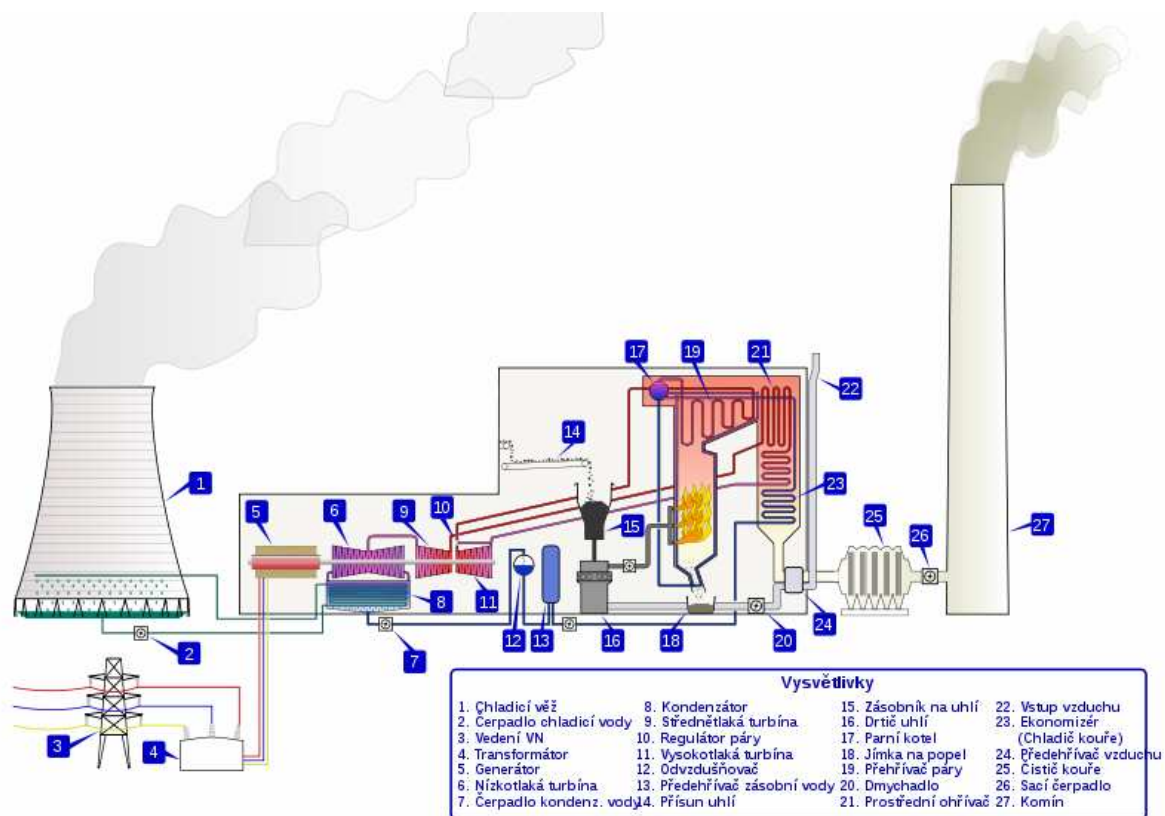
charakteru terénu v okolí odběru, typu a rozloze okolní zástavby a dalších okolností, např. přítomnosti ochranných pásem jiných inženýrských sítí.

Udržení spolehlivého a bezpečného provozu celé sítě je podmíněno spolehlivou účastí všech prvků, ze kterých je síť složena. Z pohledu funkčnosti by však bylo členění příliš složité, proto můžeme soustavu komplexněji popsat třemi základními prvky.

Mezi základní prvky elektrizační soustavy můžeme zařadit:

- *elektrárny*
- *elektrické stanice*
- *elektrické sítě*

Všechny prvky ES jsou ve vzájemné interakci, neboť dochází k neustálým změnám velikosti odběru během dne i roku, a provozovatelé zdrojů s těmito výkyvy musí počítat a provést taková opatření, aby byl chod sítí v tolerancích technických i kvalitativních. Technické a kvalitativní posouzení provozu sítí je řešeno v příslušných normativních předpisech, které jsou pro provozovatele závazné. Podrobněji popíšeme výše uvedené elementy tvořící elektrizační soustavu v dalším textu.



Obr. 1 Schéma tepelné elektrárny [8]

1.1 Elektrárny

Elektrárny jsou tvořeny zdroji elektrické energie, které mění v různých formách vázanou energii na energii elektrickou. Z pohledu užití primární formy energie je lze dělit na neobnovitelné zdroje a obnovitelné zdroje elektrické energie [7].

Neobnovitelným zdrojem energie považujeme takový zdroj využívající energii vázanou v přírodních materiálech, jejichž vyčerpání je odhadováno v horizontu maximálně stovek až desítek let. Mezi tyto materiály patří fosilní paliva, tj. černé a hnědé uhlí, ropa a zemní plyn. Ložiska těchto paliv se přírodními podmínkami tvořily miliony let.

Naopak za obnovitelné zdroje energie považujeme takové, které využívají energií přírodních živlů, která je nevyčerpatelná. Jejich využití je limitováno dostatečným objemem těchto energií, který je ještě ekonomicky akceptovatelný a umístěním těchto energií. Ve většině případů je zdroj situován v místech nejvyšších intenzit dané energie a je nutné ji transformovat na elektrickou a dopravit sítěmi do místa spotřeby. Mezi základní obnovitelné zdroje patří energie vodních toků, větrů, moří, sluneční energie, spalování biomasy a geotermální energie. Tyto zdroje jsou náchylné na atmosférické a geotermální výkyvy.

Základní vlastností elektráren je možnost regulace a reakce na okamžitou spotřebu elektrické energie v soustavě, neboť ta se mění v závislosti na ročním období, během dne a také charakterem zátěží do ní připojených.

Z hlediska technologie výroby lze rozdělit výrobní elektrické energie následovně [1]:

- *tepelné*

Tepelné elektrárny (obr. 1) pracují na principu přeměny energie vázané spalováním fosilních paliv nebo zemního plynu na energii mechanickou, která pohání turbínu a následně elektrický generátor.

- *jaderné*

Jaderné elektrárny mění energii štěpením jader uranu nebo jiných radioaktivních prvků v reaktoru na energii tepelnou, která obdobně jako v uhelné elektrárně pohání mechanicky turbínu, jež je spojena s generátorem.

- *vodní*

Vodní elektrárny (obr. 2) provádí přeměnu kinetické a potenciální energie vodního toku na elektrickou, probíhá ve vodních turbínách, které jsou mechanicky propojeny s generátorem. Mezi běžně a nejčastěji používané turbíny patří Peltonova, Francisova a Kaplanova turbína, u některých vodních děl v provedení s reverzním chodem, kdy může turbína pracovat v režimu čerpadla. Tyto elektrárny jsou přečerpávací a dosahují nejvyšších účinností [9].

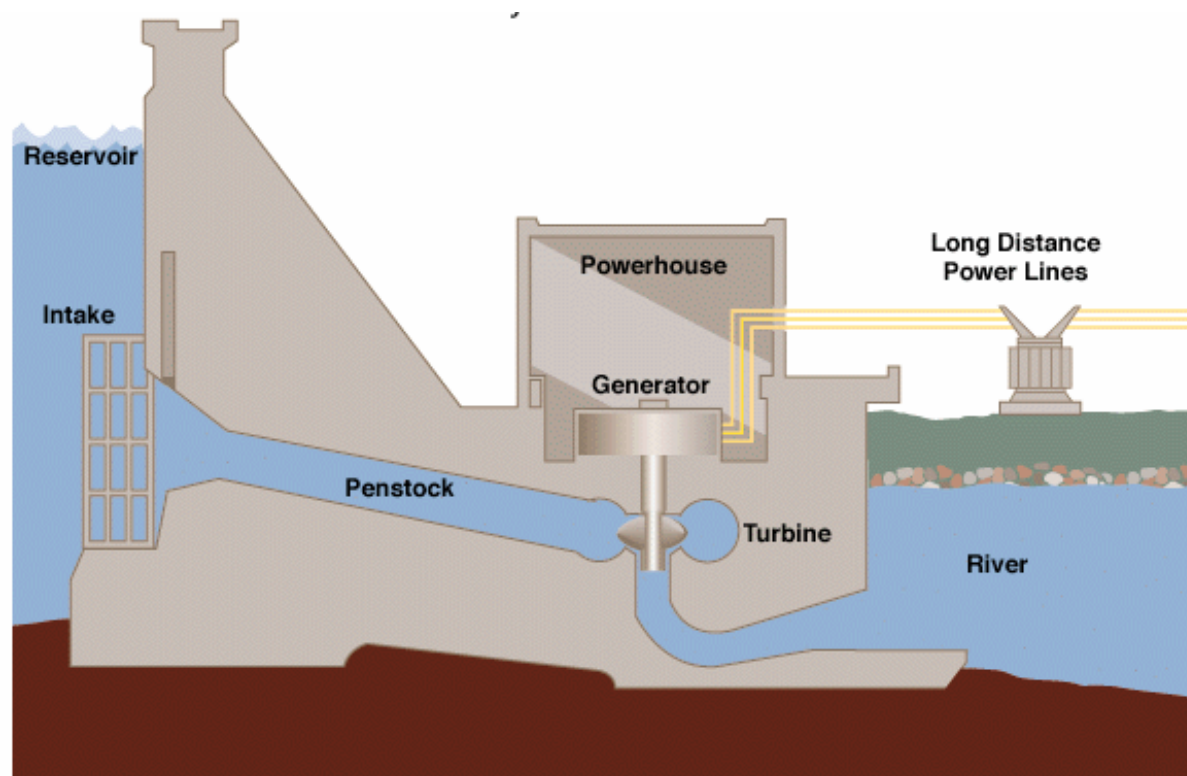
- *paroplynové*
- *z obnovitelných zdrojů*

a další.

1.2 Elektrické stanice

Elektrické stanice tvoří uzly v elektrizační soustavě, v nichž dochází ke změně její konfigurace dle provozních podmínek a k transformaci napětí. Způsob jejich vnitřního zapojení odpovídá provozním, bezpečnostním a ekonomickým požadavkům. Schéma stanice se má volit co nejjednodušší a přehledné [6].

Transformace je ve stanicích přenosové soustavy realizována pomocí síťových transformátorů řádových výkonů stovek MV·A. Typické změny napětí jsou ZVN/VVN, či VVN/VVN, tedy 400/110 kV, popř. 400/220 kV a 220/110 kV. Ve stanicích jsou tedy propojeny soustavy různých napěťových hladin, které na sebe vzájemně působí.



Obr. 2 Průřez vodní elektrárnou [9]

Umístění stanic v soustavě je dáno proximitou transformoven - tedy závislostí jejich optimálního rozložení na velikosti a konzumu zásobovaného území. Typická uvažovaná vzdálenost mezi transformovnyami přenosové soustavy je 59 km pro oblast rozlohy 10 000 m² [10].

Zapojení elektrické stanice je tvořeno přípojnícemi a odbočkami. Odbočky jsou tvořeny souborem zařízení k měření, spínání a přívodu elektrické energie. Příklad jednopólového schématu rozvodny typické stanice ZVN je na obr. 3.

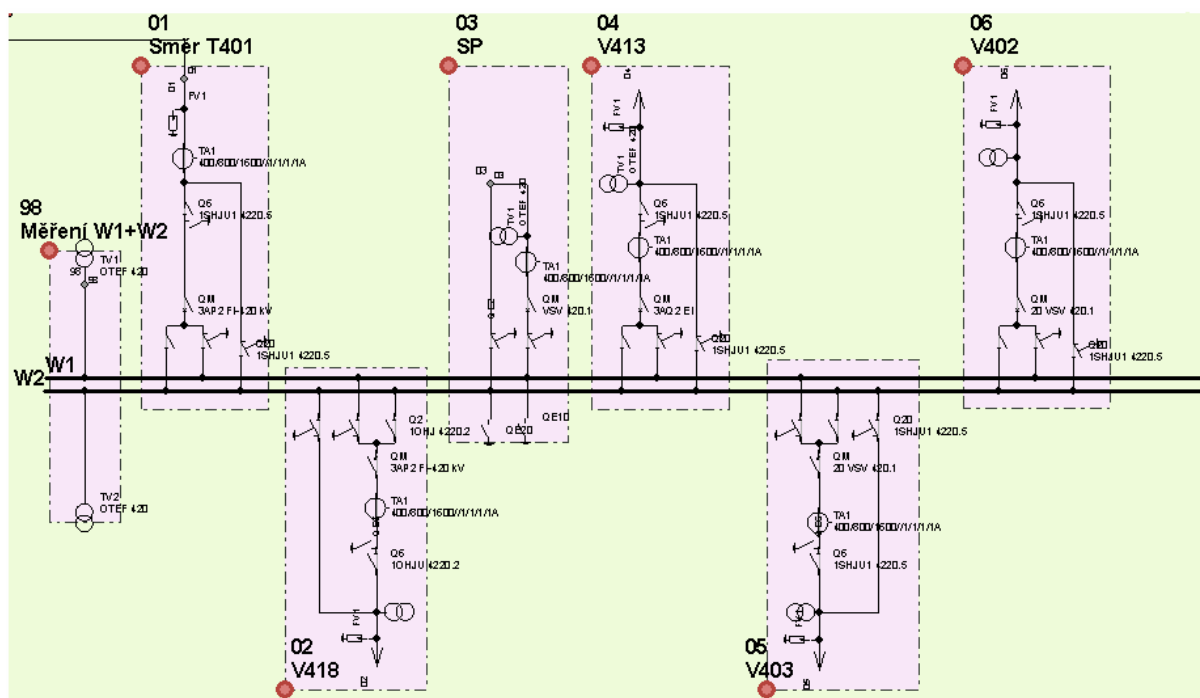
Změna konfigurace soustavy je uskutečněna spínacími prvky:

- vypínači
- odpojovači

Vypínače

Slouží ke spolehlivému zapnutí a vypnutí elektrického obvodu pod zatížením. Jsou navrženy k přerušení a obnově toku elektrické energie při běžných i mimořádných provozních podmínkách - poruchách, např. zkratech a přetíženích. Dnes jsou to složité přístroje, které v interakci s řídicím systémem a ochranami vedení představují důležitý spínací element. Dimenzování a konstrukce vypínačů jsou voleny tak, aby byly schopny vypínat jmenovité i poruchové proudy.

V současnosti je zhášení elektrického oblouku ve zhášecí komoře realizováno nejčastěji inertním plynem SF₆ nebo pomocí vakua. Mezi nejvíce rozšířené vypínače v přenosové soustavě napěťové hladiny 400 kV (obr. 4b) patří vypínače typu 3AP2FI od společnosti SIEMENS. Pro hladinu 220 kV je v rozvodně Prosenice použit vypínač typu ELFSL4-1 od firmy ABB (obr. 4a).



Obr. 3 Jednopolové schéma rozvodny 400 kV Prosenice [14]



Obr. 4a Vypínač 220 kV



Obr. 4b Vypínač 400 kV

Odpojovače

Při běžných i mimořádných manipulačních postupech, při změnách zapojení stanic v soustavě, se uplatňují vypínače v kombinaci s odpojovači (obr. 5a, obr. 5b). S ohledem na zapojení jednotlivých polí rozvodny lze např. převádět provoz mezi přípojnícemi, odstavovat vedení pro údržbové a montážní práce.

Odpojovače jsou typické tím, že nemohou spínat jmenovité a vyšší proudy, což je dáno jejich jednoduchou konstrukcí bez zhášecí komory. Jejich spínací kontakty se nazývají kontaktní hlavice. Slouží k viditelnému a bezpečnému odpojení elektrického zařízení od napětí. Manipuluje se s nimi pouze bez zatížení a rozepnutí/sepnutí obvodu je realizováno oddálením/přiblížením kontaktních hlavice obou ramen odpojovače. Nejčastějším pohonem je elektrický, realizovaný motorem na střídavý

elektrický proud. Tento systém patří mezi nejspolehlivější, energeticky nejméně náročný a přechází se na něj i u stanic nižších napětových hladin. Na obr. 5a je možné si všimnout skříní elektrického pohonu odpojovače a zemního nože (obr. 5b).

V některých distribučních stanicích hladiny VVN ještě dožívají odpojovače poháněné málo spolehlivým a energeticky hodně náročným vzduchovým pohonem. Od tohoto systému se upouští i z důvodu nutnosti instalace dalších pomocných provozů - kompresoroven.



Obr. 5a Odpojovač 220 kV



Obr. 5b Odpojovač 400 kV

1.3 Vedení přenosové soustavy

Sítě tvoří galvanické propojení mezi zdroji a odběrovými uzly. Mohou mít charakter venkovního - nadzemního vedení nebo kabelového - podzemního vedení.

Přenosové sítě 400 kV a 220 kV České republiky jsou tvořeny nadzemními vedeními určenými k přenosu velkých výkonů na velké vzdálenosti mezi hlavními uzly ES. Sítě ZVN jsou převážně provedeny jako jednoduché s vícesvazkovými vodiči, VVN 220 kV s dvojitým potahem a jednovodičové. Provozovatelem je společnost ČEPS. Přehled spravovaného zařízení této společnosti je uveden v tab. 1.

Dalšími sítěmi jsou distribuční sítě VVN bývalých rozvodných energetických závodů (REAS), které jsou složitější, hustější a slouží pro rozvod elektrické energie menších výkonů do konkrétních oblastí spotřeby a napájení významnějších odběrů. Bývají provedeny jako dvojité, méně často jako jednoduché, a jsou jednovodičové. Tyto sítě jsou vesměs nadzemní, pouze v některých případech podzemní, např. při nedodržení příslušných prostorových norem či neprůchodnosti trasy, kdy nevyhoví použití připojení nadzemním vedením.

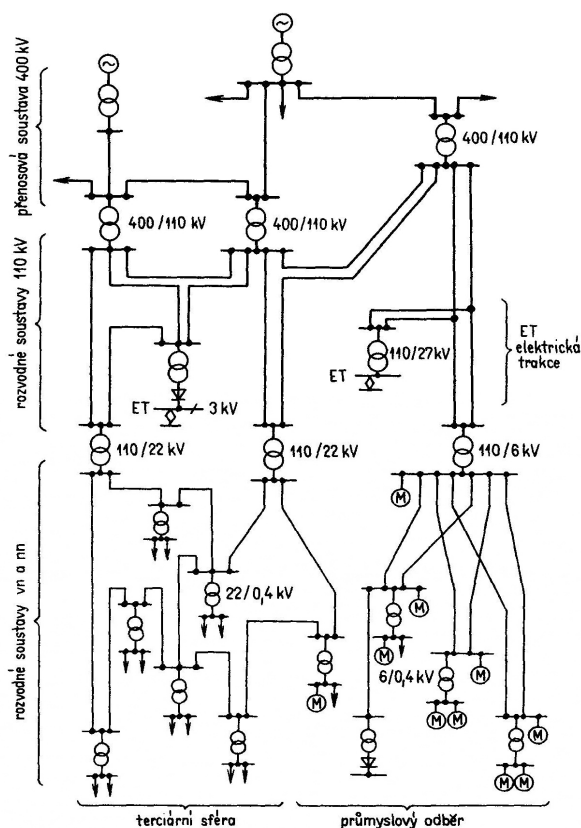
Napětové hladiny VN a NN napájí koncové spotřebitele elektrické energie a jsou jak nadzemního, tak i podzemního charakteru. V městských a průmyslových lokalitách bývá většinou provedení podzemní, v řídké obydlených oblastech nadzemní a většinou jednoduchá. Pouze některá páteřní vedení, která propojují dvě elektrické stanice bývají dvojité pro zajištění větší spolehlivosti napájení. Sítěmi těchto nižších napětí se diplomová práce nezabývá.

Z grafického vyjádření vztahu napětových hladin elektrizační soustavy vidíme i hustotu jednotlivých hladin (obr. 6). Nejméně hustá je přenosová soustava 220 kV a 400 kV, větší zahuštění

je na úrovni 110 kV a nejvyšší na hladinách napětí 22 kV a 0,4 kV, do kterých je odběratelů připojených nejvíce.

Zařízení [-]	Počet [ks]	Jednotka [-]
Množství elektřiny přenesené PS na výstupu	58 480	GW·h
Ztráty v PS	699	GW·h
Měrné ztráty	1,2	%
Délka tras vedení 400kV	2 979	km
Počet vedení 400kV	64	ks
Délka tras vedení 220kV	1 371	km
Počet vedení 220kV	34	ks
Délka tras vedení 110kV	56	km
Transformátory 440/220kV	4	ks
Transformátory 440/110kV	44	ks
Transformátory 220/110kV	22	ks
Rozvodny 420kV	24	ks
Rozvodny 245kV	14	ks
Rozvodny 123kV	1	ks

Tab. 1 Přehled zařízení společnosti ČEPS, a.s. [15]



Obr. 6 Schéma vzájemného vztahu sítí [10]

2 Teorie vedení VVN a ZVN

Elektrické ztráty na vedeních přenosové soustavy mají pro řízení a provoz elektrizační soustavy velký význam. Ztráty elektrické energie z podstaty věci vznikají ve všech prvcích přenosové soustavy a nelze je odstranit zcela, můžeme je však cíleně zmenšovat. Jejich snížení se pozitivně projeví v chodu soustavy i ekonomice provozu.

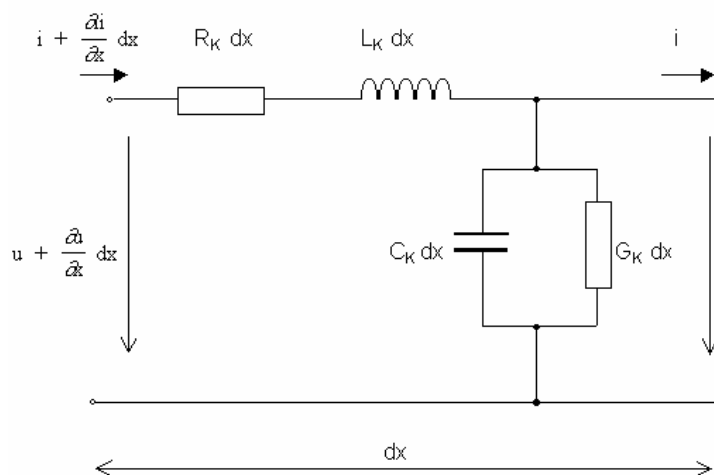
Aby bylo docíleno co nejnižších ztrát, je nutno pochopit příčiny jejich vzniku, z kterých poté lze vyvodit cestu, jak ztráty snižovat či omezovat. V této práci se zabýváme ztrátami technickými, které lze pomocí moderních řídicích a měřicích systémů snadno vyčíslit a archivovat. Data jsou přenášena optickými vlákny ze stanic do dispečinku, který tvoří centrálu řízení provozu a úložiště dat. Optická vlákna jsou součástí tzv. KZL, kombinovaného zemního lana. Z dispečerského pracoviště mohou být data exportována a je možné zpětně provést jejich analýzu.

Data napětí, proudu, činného výkonu a teploty jsou ukládána a mohou být použita pro další zpracování. Činné ztráty jsou dány rozdílem přenosu činného výkonu ze zdroje do místa odběru a obsahují tedy ztráty jak Jouleovy, tak i ztráty korónou a svodem. Při použití současných technologií není možné tyto ztráty evidovat separátně.

Pro pochopení ztrát vedení a jejich vzniku se pokusíme přiblížit teoreticky funkci vedení přenosové soustavy, které je možné popsat elektrickými parametry a náhradními schématy.

2.1 Elektrické parametry vedení

V dalších částech této práce se zaměříme podrobněji na teorii elektrických vedení a ztrát. Pro pochopení vzniku ztrát si nejprve definujeme fyzikální veličiny, které tvoří parametry vedení, a jeho zjednodušený popis náhradním obvodem. Náhradní obvod je vytvořen zapojením různého počtu prvků R , L , C . Zpravidla se pro fyzikální představu zobrazuje jednopólový model (obr. 7) s uvedením parametrů. Vedení si musíme představit jako souhrn nekonečného zapojení těchto elementů o délce dx vztažených na jednotku délky [2].



Obr. 7 Jednopólový model vedení přenosové soustavy [2]

Mezi základní parametry vedení patří:

- *činná rezistence* R [Ω]
- *provozní indukčnost* L [H]
- *svodová vodivost* G [S]
- *provozní kapacita* C [F]

Těmito čtyřmi hodnotami vztaženými na jednotku délky, zpravidla na 1 km, lze popsat každé vedení, které přenáší elektrickou energii.

Základní pohled rozsahu řešení popisu elektrických sítí vychází z teorie šíření vln. Přenos elektrické energie můžeme považovat za fyzikálně usměrněné šíření elektromagnetického vlnění, které má konečnou rychlost danou frekvencí sítě f [Hz]. Platí obecný vztah mezi rychlostí světla, vlnovou délkou a frekvencí [25]

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [2.1]$$

λ	vlnová délka	[km]
c	rychlost šíření světla	[km·s ⁻¹]
f	frekvence vlny	[Hz]

při rychlosti $c = 299\,792,458 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ bude délka vlny pro frekvenci sítě $f = 50 \text{ Hz}$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{299\,792,458}{50} = 5995,8 \text{ km}$$

Tato rychlost může být vzhledem k velikosti elektrického obvodu nekonečně velká. V tomto případě nemá rychlost šíření podstatný vliv a lze některé parametry pro zjednodušení zanedbat [18]. Jedná se o obvody

- *se soustředěnými parametry*

V opačném případě, kdy rychlost šíření není vzhledem k velikosti obvodu zanedbatelná, jedná se o obvod

- *s rozloženými parametry*

Rozlišení pohledu dle předchozího členění je důležité pro volbu správné metodiky výpočtu parametrů vedení. Platí obecná zásada, že čím je vyšší napětí a větší délka vedení, tím více parametrů je nutno respektovat pro výpočet.

Z uvedeného vyplývá, že u střídavých vedení napět'ové hladiny ZVN, tedy dlouhých vedení, zohledníme všechny parametry. U hladin VVN respektujeme pouze rezistenci R , indukčnost L a kapacitu C . Pro vedení VN, NN bereme v úvahu pouze rezistenci R a indukčnost L .

Mezi základní parametry vedení patří činná rezistence R a induktivní reaktance vedení X_L , které tvoří tzv. podélnou impedanci vedení [2]

$$\hat{Z} = \hat{R} + j \cdot \hat{X}_L \quad [2.2]$$

Z	impedance	[Ω·km ⁻¹]
R	činná rezistence	[Ω·km ⁻¹]
X_L	induktivní reaktance	[Ω·km ⁻¹]

pro reaktanci platí [1]

$$X_L = \omega \cdot L \quad [2.3]$$

L	indukčnost	[mH·km ⁻¹]
ω	úhlová frekvence	[rad·s ⁻¹]

Tato impedance má rozhodující vliv na úbytek napětí mezi začátkem a koncem vedení. Dalšími parametry jsou svodová vodivost G a kapacitní susceptance B_c, tvořící tzv. příčnou admitanci vedení [2]

$$\hat{Y} = \hat{G} + j \cdot \hat{B}_c \quad [2.4]$$

Y	admitance	[S·km ⁻¹]
G	svod (též konduktance)	[S·km ⁻¹]
B _c	susceptance	[S·km ⁻¹]

pro susceptanci platí [1]

$$B_c = \omega \cdot C \quad [2.5]$$

C	kapacita	[μF·km ⁻¹]
ω	úhlová frekvence	[rad·s ⁻¹]

kde úhlová frekvence ω

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}; \text{rad}; \text{Hz}] \quad [2.6]$$

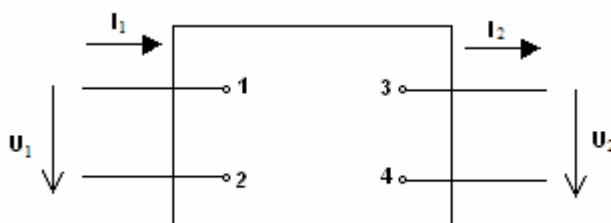
f	frekvence sítě	[Hz]
---	----------------	------

Vztah mezi impedancí Z a admitancí Y [1]

$$\hat{Z} = \frac{1}{\hat{Y}} \quad [\Omega] \quad [2.7]$$

2.2 Náhradní schéma vedení [4]

Pro zjednodušení řešení obecných sítí lze vedení nahradit modelem neboli náhradním schématem. Tento náhradní obvod je na základě teorie čtyřpólů tvořen dvěma svorkami vstupními a dvěma výstupními. Jedná se o tzv. dvojbran. Dvojbrany pracují nejčastěji jako mezičlánek přenosové cesty mezi zdroji a spotřebiči [16]. Tato teorie se užívá i při řešení ostatních silnoprůdých elektrických zařízení jako jsou motory, transformátory atd. Předpoklad důležitý pro tuto teorii je souměrnost čtyřpólu. Obecný čtyřpól je naznačen na obr. 8.



Obr. 8 Schéma dvojbranu

Pro obecný souměrný čtyřpól platí následující matematický zápis řešení

$$\hat{U}_1 = \hat{A} \cdot \hat{U}_2 + \hat{B} \cdot \hat{I}_2 \quad [V] \quad [2.8]$$

$$\hat{I}_1 = \hat{C} \cdot \hat{U}_2 + \hat{D} \cdot \hat{I}_2 \quad [A] \quad [2.9]$$

tvořené těmito parametry

$$U_1 \quad \text{vstupní napětí} \quad [V]$$

$$I_1 \quad \text{vstupní proud} \quad [A]$$

$$U_2 \quad \text{výstupní napětí} \quad [V]$$

$$I_2 \quad \text{výstupní proud} \quad [A]$$

A, B, C, D Blondelovy konstanty

Tyto rovnice popisují čtyřpól při pohledu z venku. Vnitřní struktura čtyřpólu není uvažována. Při uvažování vnitřního zapojení pomocí R, L, C se používají nejčastěji základní 3 typy náhradních obvodů, tzv. články:

- T
- $\Pi(pí)$
- $\Gamma(gama)$

Jelikož vedení nemá v celé délce stejné parametry, nelze ho považovat za homogenní a nahrazujeme jej nesouměrnými čtyřpóly, pro které platí

$$A \neq D$$

Obvod si pro zjednodušení zredukujeme do tvaru hvězdy, která má ekvivalenci v T článku, nebo Π článku, který má duálně význam trojúhelníka. V následujícím textu si ukážeme platné vztahy pro uvedené náhradní obvody.

T článek

Tento model je vhodný pro vedení délky maximálně 300 km. Přenosová soustava ČR má nejdelší vedení V413 ze stanice Prosenice do Řeporyjí o délce asi 284 km, vystačíme si tedy v naší republice s tímto článkem. Pro řešení napětí a proudu obecného T článku z obr. 9 platí rovnice

$$\hat{U}_1 = \hat{U}_2 + \hat{Z}_2 \cdot \hat{I} + \hat{Z}_1 \cdot (\hat{I} + \hat{I}_2) \quad [2.10]$$

$$\hat{I}_2 = \hat{U} \cdot \hat{Y}_1 = (\hat{U}_2 + \hat{Z}_2 \cdot \hat{I}) \cdot \hat{Y}_1 \quad [2.11]$$

Po dosazení proudu do rovnice napětí

$$\begin{aligned} \hat{U}_1 &= \hat{U}_2 + \hat{Z}_2 \cdot \hat{I} + \hat{Z}_1 \cdot (\hat{I} + \hat{I}_2) = \hat{U}_2 + \hat{Z}_2 \cdot \hat{I} + \hat{Z}_1 \cdot (\hat{I} + (\hat{U}_2 + \hat{Z}_2 \cdot \hat{I}) \cdot \hat{Y}_1) = \\ &= \hat{U}_2 + \hat{Z}_2 \cdot \hat{I} + \hat{Z}_1 \cdot (\hat{I} + \hat{U}_2 \cdot \hat{Y}_1 + \hat{Z}_2 \cdot \hat{I} \cdot \hat{Y}_1) = \hat{U}_2 + \hat{Z}_2 \cdot \hat{I} + \hat{Z}_1 \cdot \hat{I} + \hat{Z}_1 \cdot \hat{U}_2 \cdot \hat{Y}_1 + \hat{Z}_1 \cdot \hat{Z}_2 \cdot \hat{I} \cdot \hat{Y}_1 = \\ &= \hat{U}_2 \cdot (1 + \hat{Z}_1 \cdot \hat{Y}_1) + \hat{I} \cdot (\hat{Z}_1 + \hat{Z}_2 + \hat{Z}_1 \cdot \hat{Z}_2 \cdot \hat{Y}_1) \end{aligned} \quad [2.12]$$

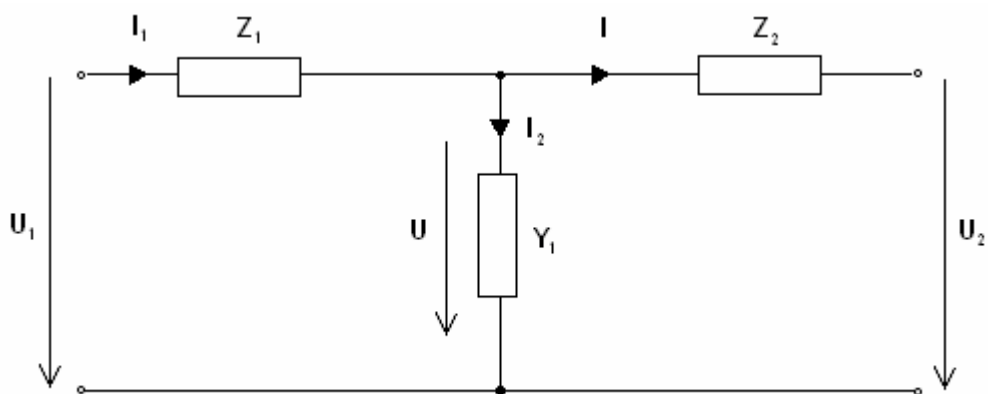
Pro proudy platí

$$\hat{I}_1 = \hat{I} + \hat{I}_2 = \hat{I} + \hat{U}_2 \cdot \hat{Y}_1 + \hat{Z}_2 \cdot \hat{I} \cdot \hat{Y}_1 = \hat{U}_2 \cdot \hat{Y}_1 + \hat{I} \cdot (1 + \hat{Z}_2 \cdot \hat{Y}_1) \quad [2.13]$$

Po dosazení proudu do rovnice

$$\hat{I}_1 = \hat{I} + \hat{I}_2 \quad [2.14]$$

$$\hat{I}_1 = \hat{U}_2 \cdot \hat{Y}_1 + \hat{I} + \hat{Z}_2 \cdot \hat{I} \cdot \hat{Y}_1 \quad [2.15]$$



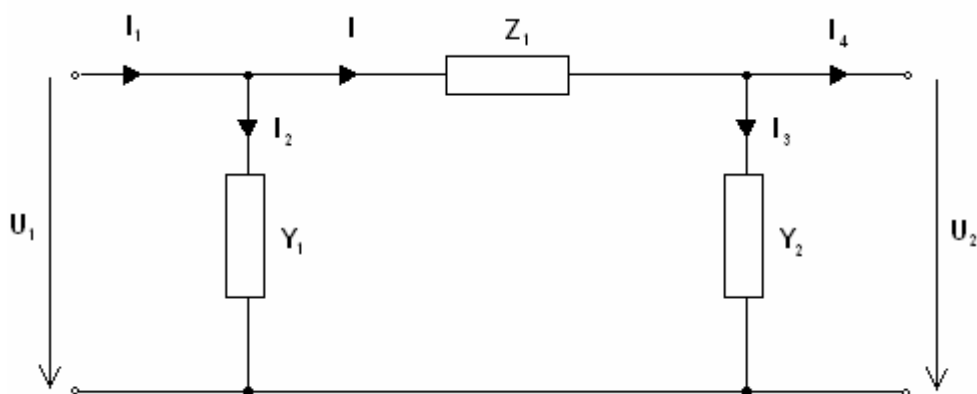
Obr. 9 Náhradní schéma T článku

PÍ článek

Náhrada pomocí PÍ článku je přesnější pro vedení o délce 300 až 500 km. Výpočet parametrů vedení při použití tohoto článku u nás není nutný, neboť takových délek u nás vedení nedosahují. Bylo by však zajímavé porovnat výsledky výpočtů pomocí T a PÍ článku pro vedení V413, které se blíží délce 300 km. Pro řešení napětí a proudu obecného Π článku z obr. 10 platí rovnice

$$\hat{U}_1 = \hat{U}_2 \cdot (1 + \hat{Y}_2 \cdot \hat{Z}_1) + \hat{I}_4 \cdot \hat{Z}_1 \quad [2.16]$$

$$\hat{I}_1 = \hat{U}_2 \cdot (\hat{Y}_1 + \hat{Y}_2 + \hat{Y}_1 \cdot \hat{Y}_2 \cdot \hat{Z}_1) + \hat{I}_4 \cdot (1 + \hat{Y}_1 \cdot \hat{Z}_1) \quad [2.17]$$



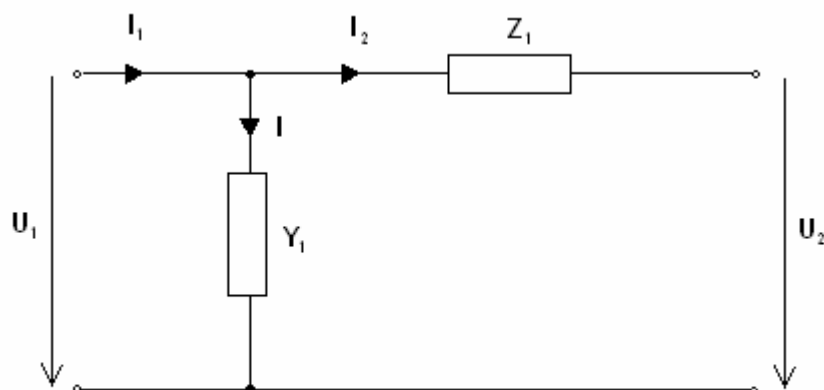
Obr. 10 Náhradní schéma PÍ článku

Gama článek

Pro řešení napětí a proudu obecného Γ článku z obr. 11 platí rovnice

$$\hat{U}_1 = \hat{U}_2 + \hat{Z}_1 \cdot \hat{I}_2 \quad [2.18]$$

$$\hat{I}_1 = \hat{U}_2 \cdot \hat{Y}_1 + \hat{I}_2 \cdot (1 + \hat{Y}_1 \cdot \hat{Z}_1) \quad [2.19]$$



Obr. 11 Náhradní schéma Gama článku

Při dílčích rozborech elektrizační soustavy nesmíme opomenout, že konkrétně řešené zařízení přenosové soustavy není tvořeno pouze vedeními, ale je to komplex zařízení, která spolu vytváří jeden systém. Z tohoto pohledu, tedy spojením různého počtu čtyřpólů, můžeme dostat ucelený teoretický model jakékoliv části elektrizační soustavy, který je pro řešení značně složitý. Tento model se nazývá čtyřpól se složenými konstantami. Jejich řazení může být sériové, paralelní nebo jejich kombinací. Nyní popíšeme tzv. Blondelovy konstanty, při jejichž znalosti můžeme vyčíslit hodnoty vstupního proudu a napětí.

Mimo uvedené metody řešení je možné užití Steinmetzova článku vzniklého spojením T a P článku a metody Fallou diagramu (do 300 km délky vedení).

2.3 Blondelovy konstanty [2]

Při řešení vedení VVN a ZVN se vychází ze zadaných poměrů jednoho konce vedení pro stanovení poměrů druhého konce. Při znalosti poměrů můžeme určit účinnost přenosu a činné ztráty vedení. Vedení 400 kV a 220 kV nahrazujeme modelem s rozloženými parametry, tzn. že při výpočtech bereme v úvahu všechny náhradní parametry vedení. Pro vyčíslení poměrů hledaného vedení použijeme Blondelovy konstanty, kdy pro výpočet vstupních hodnot obvodu platí soustavy rovnic [2.8] a [2.9]. Členy A, B, C, D nazýváme Blondelovy konstanty.

$$\hat{A} = \cosh(\hat{\gamma} \cdot l) \quad [-] \quad [2.20]$$

$$\hat{B} = Z_v \cdot \sinh(\hat{\gamma} \cdot l) \quad [\Omega] \quad [2.21]$$

$$\hat{C} = \frac{\sinh(\hat{\gamma} \cdot l)}{\hat{Z}_v} \quad [S] \quad [2.22]$$

$$\hat{D} = \cosh(\hat{\gamma} \cdot l) \quad [-] \quad [2.23]$$

γ	konstanta přenosu	$[\text{km}^{-1}]$
l	délka vední	$[\text{km}]$

Konstantu přenosu, jinými slovy činitel šíření vypočítáme jako druhou odmocninu ze součinu impedance a admittance

$$\hat{\gamma} = \sqrt{\hat{Z} \cdot \hat{Y}} \quad [2.24]$$

2.4 Přirozený výkon vedení [1]

Pro porovnání přenosové schopnosti se u vedení ZVN a VVN se používá pojem přirozený výkon. Je to výkon, při kterém je impedance na konci vedení rovna vlnové impedanci. Z důvodu převažující reálné složky přirozeného výkonu vůči imaginární se tento výkon udává nejčastěji v [MW]. Vlnovou impedanci vypočítáme

$$\hat{Z}_v = \sqrt{\frac{\hat{Z}}{\hat{Y}}} \quad [2.25]$$

Z_v vlnová impedance $[\Omega]$

Přirozený výkon je roven podílu

$$\hat{S}_p = \frac{\hat{U}_s^2}{\hat{Z}_v} \quad [2.26]$$

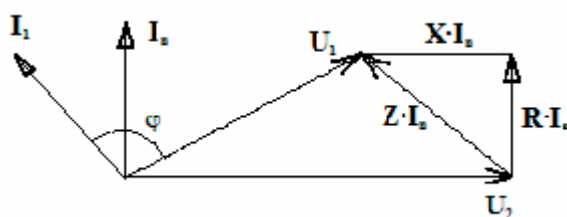
S_p zdánlivý výkon $[V \cdot A]$

U_s sdružené napětí $[V]$

V případě provozování vedení pod hodnotou přirozeného výkonu má vedení induktivní charakter, při provozu nad hodnotou přirozeného výkonu má kapacitní charakter. Kapacitní charakter je vzhledem ke ztrátám nežádoucí. Typické hodnoty přirozených výkonů pro jednotlivé napěťové hladiny je možné najít v příslušné literatuře [1]. Vhodným provozováním vedení se lze k přirozenému výkonu vedení přiblížit a celkově tak působit pozitivně na jeho provoz a celou soustavu.

2.5 Ferrantiho jev [4]

Ferrantiho jev se projevuje vyšší hodnotou napětí na výstupu vedení, než je jeho velikost na vstupu. Vedením prochází jen kapacitní, nabíjecí proud, který je posunut o $\pi/2$ před napětím. Tento proud vytváří na indukční reaktanci a činné rezistenci úbytky napětí. Jeho průběh klesá rovnoměrně z maximální hodnoty napájecího místa do nulové hodnoty na konci vedení. Je typický pro vedení naprázdno. V praxi se objevuje při zapínání dlouhých vedení ZVN a VVN.



Obr. 12 Fázorový diagram poměrů vedení při vzniku Ferrantiho jevu

V další části se zaměříme na teorii technický ztrát přenosových vedení společnosti ČEPS, a.s., které jsou hlavním předmětem zájmu této práce. Při teoretickém stanovení ztrát těchto sítí bychom museli respektovat všechny parametry, pouze u vedení 220 kV můžeme při výpočtech zanedbat svod G.

3 Teorie ztrát elektrické energie

Ztráty můžeme rozdělit na obchodní a technické. Na obchodní ztráty se tato práce nezaměřuje, jsou v podstatě dány nepřesnostmi v použitých měřicích prvcích. Technické ztráty souvisejí s platnými fyzikálními zákony a tato diplomové práce se jimi zabývá. Tyto ztráty můžeme určit dvěma způsoby [4]:

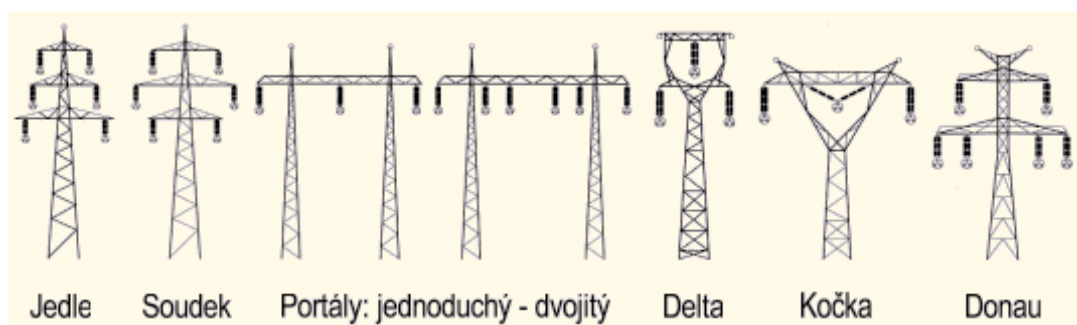
- měřením
- výpočtem

V práci jsou použity hodnoty ztrát měřených, poskytnutých společnostmi ČEPS. Jsou to komplexní hodnoty zahrnující všechny technické ztráty, se kterými se seznámíme v další části textu. Obsahují svodové ztráty, Jouleovy a ztráty korónou.

Určení ztrát výpočtem je značně složité a zdouhavé [3]. Pro jejich správné vyčíslení je nutný detailní technický popis konstrukce počítaného vedení. Předpokladem pro výpočet ztrát je také velmi vysoká znalost teoretické elektrotechniky a vysoká odbornost.

Při pojmu ztráty nás ihned napadne myšlenka účinnosti, neboť jsou tyto dva pojmy svázány a souvisejí spolu. Všechny prvky ES mají účinnost η danou použitými přístroji a materiály, ze kterého je dané zařízení vyrobeno, zdroje jsou navíc ještě limitovány použitou technologií výroby elektrické energie. Tyto účinnosti jsou v podstatě výsledkem kompromisu mezi ekonomickými a technickými požadavky pro její výrobu a rozvod. I vedení, které je tvořeno podpěrnými body, izolátory, vodiči, zemními lany atd., jsou navržena tak, aby bylo tomuto kompromisu vyhověno.

Při hledání řešení přenosu elektrické energie z místa výroby do místa spotřeby se nejprve vedení navrhne elektricky a poté mechanicky. Základními prvky každého vedení jsou podpěrné body. Jejich správný návrh a vhodné geometrické rozmístění vodičů má velký vliv na ztrátovost celého vedení. U většiny sítí ZVN, VVN se jedná o příhradové stožáry s betonovými základy, jak je uvedeno na obr. 13.



Obr. 13 Základní typy používaných podpěrných bodů hladin ZVN a VVN [11]

Účinnost vedení můžeme vyjádřit účinností přenosu, která je dána podílem výkonu na konci vedení a příkonu na jeho začátku

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \quad [3.1]$$

η	účinnost	[%]
P_2	výkon přivedený na konec vedení	[W]
P_1	příkon dodaný na začátku vedení	[W]

Obecně můžeme vyčíslit ztráty jako rozdíl příkonu dodaného a výkonu přeneseného na konec vedení

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad [\text{W}] \quad [3.2]$$

Vznik elektrické energie je provázen třemi jevy, které spolu souvisí a jsou neoddělitelné. Úvaha platí obecně pro všechny úrovně napětí střídavých sítí. Můžeme o ní prohlásit, že je tvořena obvodem [4]:

- *proudovým*
- *magnetickým*
- *dielektrickým*

Proudový obvod

Proudovým obvodem nazýváme všechny vodiče, které jsou protékány elektrickým proudem a tvoří vodivou cestu, kterou usměřujeme trasu vedení od místa odběru do místa spotřeby. Vodiče kladou odpor průchodu proudu. Tato vlastnost je nazývána rezistencí a představuje činnou hodnotu ztrát. Mezi proudový obvod ale můžeme teoreticky zařadit i všechny nevodiče, které neslouží k vedení elektrického proudu. Můžeme prohlásit, že není dokonalých izolantů, jak je naznačeno v úvodu.

Magnetický obvod

Druhým obvodem je magnetický, který vytváří magnetické pole kolem vodiče protékaného elektrickým proudem. Příslušný magnetický tok je přímo úměrný velikosti proudu, který vodičem teče

$$\Phi = L \cdot I \quad [3.3]$$

Φ	magnetický tok	[Wb]
L	indukčnost vodiče	[H]
I	elektrický proud	[A]

Tento obvod však již nemůžeme považovat za ztrátový, neboť bez jeho existence není možný přenos elektrické energie.

Dielektrický obvod

Dielektrický obvodem můžeme obecně nazvat elektrické pole vznikající mezi různými potenciály. V našem případě, kdy řešíme vedení přenosové soustavy, je to pole mezi vodiči samotnými, mezi vodiči a zemí. Zemí myslíme všechny se zemí spojené části, mezi které patří podpěrné body, ukotvení izolátorových řetězců na nich. Charakteristickou vlastností tohoto obvodu je přítomnost elektrického náboje, pro nějž platí

$$Q = C \cdot U \quad [3.4]$$

Q	úhrn elektrického náboje	[C]
C	kapacita vodiče	[F]
U	napětí	[V]

Zde je velikost náboje úměrná napětí, tedy rozdílu potenciálu.

Z hlediska fyzikálního je každé vedení ztrátové. Ztráty představují část vyrobené elektrické energie, která není využita, ale musí být dodána zdroji.

V této práci se zabýváme technickými ztrátami, mezi které můžeme zahrnout:

- *ztráty rezistencí (Jouleovy ztráty, skin efekt), mluvíme o ztrátách ve vodiči*
- *ztráty svodem, ztráty dielektrické*
- *ztráty korónou, rovněž ztráty dielektrické*

Uvedené ztráty mají činný charakter a lze říci, že komplexně vystihují vhodnost konstrukce a použití materiálů daného vedení.

3.1 Jouleovy ztráty

Průchodem proudu vodičem vzniká teplo. Teplo je úměrné druhé mocnině proudu jím procházejícím [3.8]. Tyto ztráty jsou nejvyšší ze všech uvažovaných v této práci a jejich velikost primárně závisí na velikosti proudu procházejícího vodičem. Pro jejich pochopení se jimi budeme zabývat nejpodrobněji.

Vedení je tvořeno vodičem, který slouží k vedení elektrického proudu. Materiály vodičů jsou nejčastěji hliník Al, měď Cu a ocel. Rezistence je vlastnost materiálu, určeného k vedení elektrického proudu, kládá odpor průchodu elektrického proudu. Schopnost vést nebo nevést elektrický proud je dána atomickým složením každé látky, jež je závislá na počtu volných elektronů v použitém materiálu a na vazbách mezi atomy.

Z tohoto pohledu rozlišujeme 4 základní typy látek:

- vodiče
- izolanty
- polovodiče
- supravodiče

Čím více má materiál volných elektronů, tím lepším je látka vodičem, má menší rezistenci a naopak. V úvahách se zaměříme na první dva typy, které nejvíce nalézají uplatnění v elektroenergetice. V případě Jouleových ztrát mluvíme pouze o vodičích. Mluvíme-li o ztrátách rezistencí, dají se charakterizovat jako energie nutná k překonání odporu vodiče.

Pro vyjádření ztrát vedení rezistencí vyjdeme z Ohmova zákona, kdy platí [4]

$$R = \rho \cdot \left(\frac{l}{S} \right) \quad [3.5]$$

R	rezistence vodiče	[Ω]
ρ	měrný odpor vodiče	[Ω·mm ² ·km ⁻¹]
l	délka vodiče	[km]
S	průřez vodiče	[mm ²]

Odpor vodiče je udáván při určité teplotě, většinou 20 °C. Rezistence materiálů používaných v přenosových soustavách bývá nízká, řádově kolem setin až desetin Ω·km⁻¹. Vzhledem k délkám vedení přenosové soustavy vychází celková rezistence vyšší než u soustav nižších napěťových hladin. Mimo závislost rezistence na použitém materiálu vodiče, závisí také na teplotě vodiče, která je závislá na teplotě okolí a zatížení proudem I. Je prokázána přímá úměra mezi teplotou vodiče a rezistencí.

Teplotní závislost rezistence a okolního prostředí můžeme vyjádřit [4]

$$R_T = R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad [3.6]$$

R _T	rezistence při dané teplotě	[Ω]
R ₂₀	rezistence při 20 °C	[Ω]
α	teplotní součinitel odporu	[K ⁻¹]
ΔT	rozdíl teplot	[K]

Z výše uvedeného vzorce je zřejmá závislost činných ztrát na teplotě, které se mohou při velkých přenášených výkonech významně měnit i v závislosti na teplotě okolí a vodiče. V přenosových sítích se používají k vedení elektrické energie především AlFe lana a hodnotu rezistence použitého vodiče pro konkrétní typ vedení vztaženou na jednotku délky lze najít v katalozích firem, zabývajících se jejich výrobou. Výsledná hodnota rezistence je součinem délky vedení a velikostí rezistence vztaženou na jednotku délky

$$R_c = R_v \cdot l \quad [3.7]$$

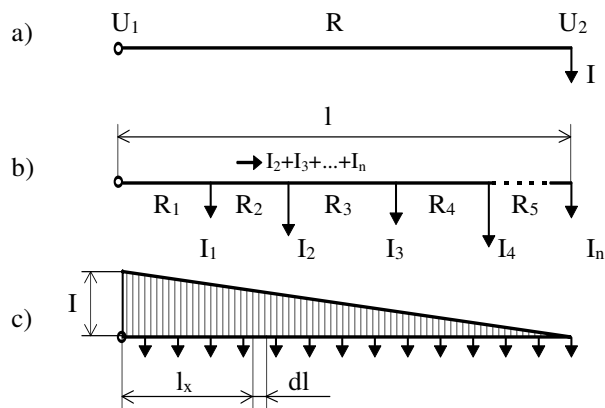
R_v	rezistence udávaná výrobcem	$[\Omega \cdot \text{km}^{-1}]$
L	délka vedení	$[\text{km}]$
R_c	výsledná rezistence	$[\Omega]$

Pro stanovení ztrát vedení rezistencí platí vztah [4]

$$\Delta P_r = k_z \cdot R_c \cdot I^2 \quad [3.8]$$

ΔP_r	ztráty rezistencí	$[\text{kW}]$
I	proud vodičem	$[\text{A}]$
k_z	koeficient zatížení	$[-]$

Koeficient zatížení k_z je roven 3 v případě, kdy vedení nemá po své délce odběry a můžeme konstatovat, že celou jeho délkou teče stejný proud až do místa odběru (obr. 14a). Toto lze předpokládat u ZVN a VVN a některých distribučních sítí, na které se práce zaměřuje. U vedení, zpravidla NN, která mají po své délce odběry ve stejných vzdálenostech je $k_z = 1$.



Obr. 14 Možnosti zapojení zátěží podél vedení [20]

Ztráty povrchovým jevem [4]

Ztráty povrchovým jevem můžeme zahrnout mezi ztráty Jouleovy. Průchodem proudu vodičem vzniká povrchový jev neboli skin-efekt. Je způsoben tím, že střídavé pole má nejvyšší intenzitu na povrchu vodiče. Vnitřní část vodiče není tolik využita k vedení proudu, což se projeví zvýšením činného odporu. Tyto ztráty jsou vzhledem k velikosti síťové frekvence zanedbatelné.

3.2 Ztráty svodem

Svodová vodivost, konduktance, tvoří jeden z parametrů příčné admitance vedení, který se u napěťových hladin 400 kV a 220 kV obvykle nezanedbává při výpočtech, protože jeho velikost již

dosahuje zajímavých hodnot. Izolátorový řetězec, sloužící k mechanickému upevnění vodivého lana ke konstrukci podpěrného bodu není dokonalým izolantem. Prochází jím tedy uvnitř i vně proud, který vytváří činné ztráty. Ztráty svodem vznikají znečištěním povrchu izolátorů, nebo zmenšením jejich izolačního odporu vlivem vnějších klimatických podmínek. Následný svodový proud vznikající nedokonalostí izolace vodičů vůči zemi teče touto proudovou dráhou. Tyto ztráty rovněž negativně ovlivňuje stárnutí izolace.

Snížení svodových ztrát lze dosáhnout použitím nových izolačních materiálů a vhodnou volbou tvaru izolátorů, což lze doložit experimentálně. Nejjednodušší cesta k jejich snížení je prodloužení proudové dráhy mezi vodičem a nevodivou částí.

Svodové ztráty lze vyčíslit [1]

$$\Delta P_s = 3 \cdot U_f^2 \cdot G = 3 \cdot \left(\frac{U_s}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot G = U_s^2 \cdot G \quad [3.9]$$

ΔP_s	ztráty svodem	[kW·km ⁻¹]
U_s	sdružené napětí	[kV]
U_f	fázové napětí	[kV]
G	svodová vodivost	[S·km ⁻¹]

Pro určení ztrát svodem je nutné znát vodivost G daného vedení a napětí. Tyto hodnoty jsou dostupné z údajů ED Ostrava a lze tento druh ztrát teoreticky početně vyjádřit. Jedná se o ztráty způsobené nedokonalostí dielektrika použitého materiálu.

3.3 Ztráty korónou

Koróna je další doprovodný jev přenosu elektrické energie. Projevuje se světelnými a zvukovými efekty. Jedná se o bledě fialový až narůžovělý výboj doprovázený tzv. sršením. Koróna je výbojem vznikajícím na vodičích při sníženém přeskokovém napětí na vedeních při překročení dielektrické pevnosti vzduchu. Toto překročení se nazývá počáteční napětí a je závislé na atmosférických podmínkách a fyzikálních rozměrech vodiče a lze určit Peekovým vztahem [5]:

$$U_0 = 21,1 \cdot \delta \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot r \cdot \ln \frac{d}{r} \quad [3.10]$$

U_0	počáteční napětí koróny	[kV]
δ	relativní hustota vzduchu	[-]
m_1	vliv povrchu vodiče	[-]
m_2	vliv počasí	[-]
r	poloměr vodiče	[cm]
d	střední vzdálenost vodičů	[cm]

Ze vzorce je zřejmé, že počáteční napětí koróny je silně ovlivněno geometrickými rozměry vedení a okolním prostředím. Ztráty korónou jsou způsobeny nedokonalostí izolace vodičů mezi sebou a lze je vyjádřit [5]

$$\Delta P_k = 3 \cdot \frac{241}{\delta} \cdot (f + 25) \cdot \sqrt{\frac{r}{d}} \cdot (U_f - U_0) \cdot 10^{-5} \quad [3.11]$$

U_f	průměrné fázové napětí	[kV]
-------	------------------------	------

Z výše uvedeného plyne určitá míra závislosti mezi materiály používanými pro přenos elektrické energie hladinami VVN, ZVN a velikostí činných ztrát, vedením proudu těmito přenosovými linkami.

Z charakteru přenosové soustavy plyne, že vedení dosahují velkých délek, v některých případech až několika stovek kilometrů a přenáší velké výkony ve stovkách MW. Parametry vedení jsou tedy závislé na jeho vhodném uspořádání po celé délce trasy.

4 Vybrané statistické pojmy pro řešení predikce technických ztrát u vedení přenosové soustavy

Pro matematický popis hledané závislosti mezi technickými ztrátami a venkovní teplotou je nutné zvolit vhodnou početní metodu a mít k dispozici ucelené údaje. Metoda popisu musí být jednoduchá, vhodná pro zpracování objemného množství dat. Při stanovení závislosti velikosti Joulových ztrát, ztrát korónou a ztrát svodem na venkovní teplotě, jsou použita data společnosti ČEPS, která je zaznamenává průběžně na serverech řídicího systému. Hodnoty teplot v transformovnách a ztrát vedení jsou ukládána řídicím systémem dispečinku ČEPS. Postup při jejich zpracování je uveden v kapitole 5.

Popíšeme si základní pojmy důležité pro zpracování velkého objemu informací při řešení naší úlohy, kterými jsou:

- *regrese*
- *aritmetický průměr*
- *relativní chyba*

4.1 Regresní analýza

Regresi můžeme chápat jako odhad hodnot jedné veličiny při znalosti druhé. Proto, abychom mohli odhad co nejvěrněji určit, musíme zvolit vhodný matematický popis závislosti, tedy hledáme obecnou funkci, kterou odhad matematicky vyjádříme. Při stanovení vhodné regrese pro určení ztrát můžeme vyjít ze skutečnosti, že ztráty jsou součástí vyrobené elektrické energie. Analogicky můžeme pro jejich určení využít podobných postupů jako v případě prognózy výroby elektrické energie [23].

Volíme zpravidla jednodušší funkce [6], jejichž výsledek je snadný pro výpočet a dostatečně přesný, můžeme volit např.:

- *přímku* $y = a + b \cdot x$ [4.1]

- *kvadratickou funkci* $y = a + b \cdot x + c \cdot x^2$ [4.2]

- *polynom 3. stupně* $y = a + b \cdot x + c \cdot x^2 + d \cdot x^3$ [4.3]

- *obecný polynom* $y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \dots +$ [4.4]

- *exponenciální funkci* $y = a \cdot b^x$ [4.5]

Proměnnou y jsou naměřené technické ztráty, které jsou funkcí naměřených teplot označených x . Z uvedených regresních rovnic se jeví jako nejvhodnější pro další práci s daty náhrada funkce polynomem a přímkou, jak je podrobněji popsáno v kapitole 6.

4.2 Aritmetický průměr

Aritmetický průměr je dán součtem n hodnot jedné veličiny vztažené k celkovému počtu jejích hodnot.

Můžeme jej vyjádřit následovně [25]

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad [4.6]$$

N počet proměnných [ks]
 x_i hodnota veličiny

Využití průměru u této práce je důležité při stanovení teploty v okolí vedení při znalosti teplot ve dvou stanicích, které jsou vedením propojeny. V naší úloze vycházíme ze znalosti teplot ve stanicích, které jsou zaznamenány řídicím systémem. Všechny stanice přenosové soustavy České republiky se nacházejí v geograficky a teplotně podobném území. Z tabulek teplot jednotlivých stanic jsou patrné menší rozdíly teplot (příloha 4 a 5), ze kterých je vytvořen aritmetický průměr. Tímto je hodnota teploty zpřesněna a blíží se skutečné teplotě.

4.3 Relativní chyba

Při výpočtu vypočítané hodnoty ztrát použijeme vztah pro relativní chybu

$$\delta_x = \frac{\Delta x}{x_n} \cdot 100 \quad [4.7]$$

a pro Δx platí

$$\Delta x = x_n - x_v$$

x_n naměřená hodnota
 x_v vypočítaná hodnota

Hodnoty relativních chyb konkrétních vedení jsou uvedeny v tab. 11 až tab. 14.

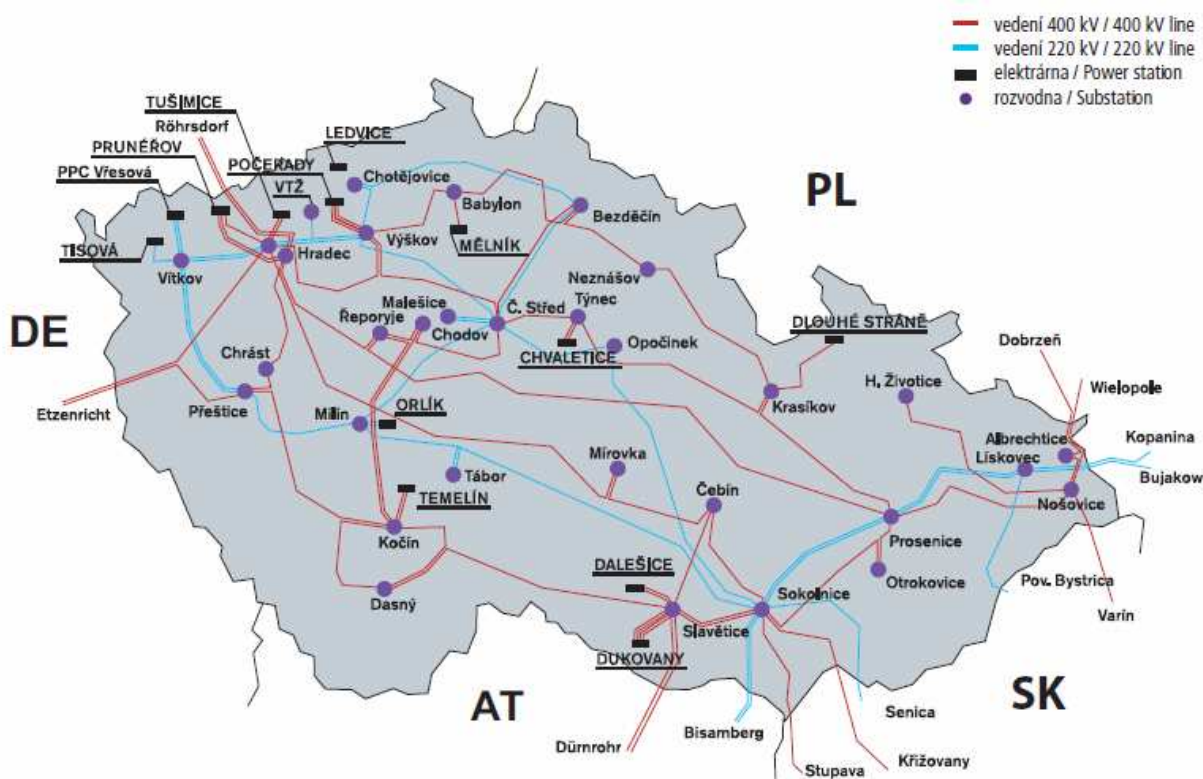
5 Tvorba databází měřených veličin ztrát a teplot pro výpočty predikcí u vedení přenosové soustavy

V diplomové práci se zabýváme možností predikce činných ztrát vedení společnosti ČEPS, a.s. na venkovní teplotě, a vycházíme z dat, která byla naměřena a zaznamenána na ED ČEPS v Ostravě [12]. Pro určení matematické závislosti, která by spolehlivě nahradila průběh naměřených hodnot, je volena metoda polynomů, která může tvořit základní pilíř pro predikci činných ztrát jednotlivých vedení v dalších aplikacích. Polynomy popisují matematickou funkcí průběhy křivek činných ztrát v závislosti na venkovní teplotě. Pro jejich správné generování je uveden postup zpracování popsáný v kapitole 5.4.

Venkovní teplota je měřena nikoliv přímo v bezprostředním okolí vodiče, ale v objektu transformoven, např. na dozornách a proto je nutné zavést zjednodušující předpoklad. Uvažujeme, že teplota měřená v objektu odpovídá přibližně teplotě okolí vodiče vedení, neboť se geograficky jedná o totéž území.

Činné ztráty jsou dopočítávány ze znalosti přenášených výkonů a parametrů elektrické energie, tedy proudu I a napětí U , které jsou měřeny pomocí PTP a PTN v každém vývodu stanic. Ze všech odboček (polí) rozvodny je signál velikosti proudu a napětí přenášen do řídicího systému, kde je archivován. Údaje o přenášených výkonech se zobrazují na monitorech dispečinku ČEPS v Ostravě. Prvotně jsou data stažena z řídicího systému a uložena ve formátu Microsoft Excel.

Ukážeme si v další části možnou metodu pro zpracování a vyhodnocení databází.



Obr. 15 Mapa sítě 400 kV a 220 kV [13]

5.1 Schéma sítě a teplotní mapy přenosové soustavy ČR

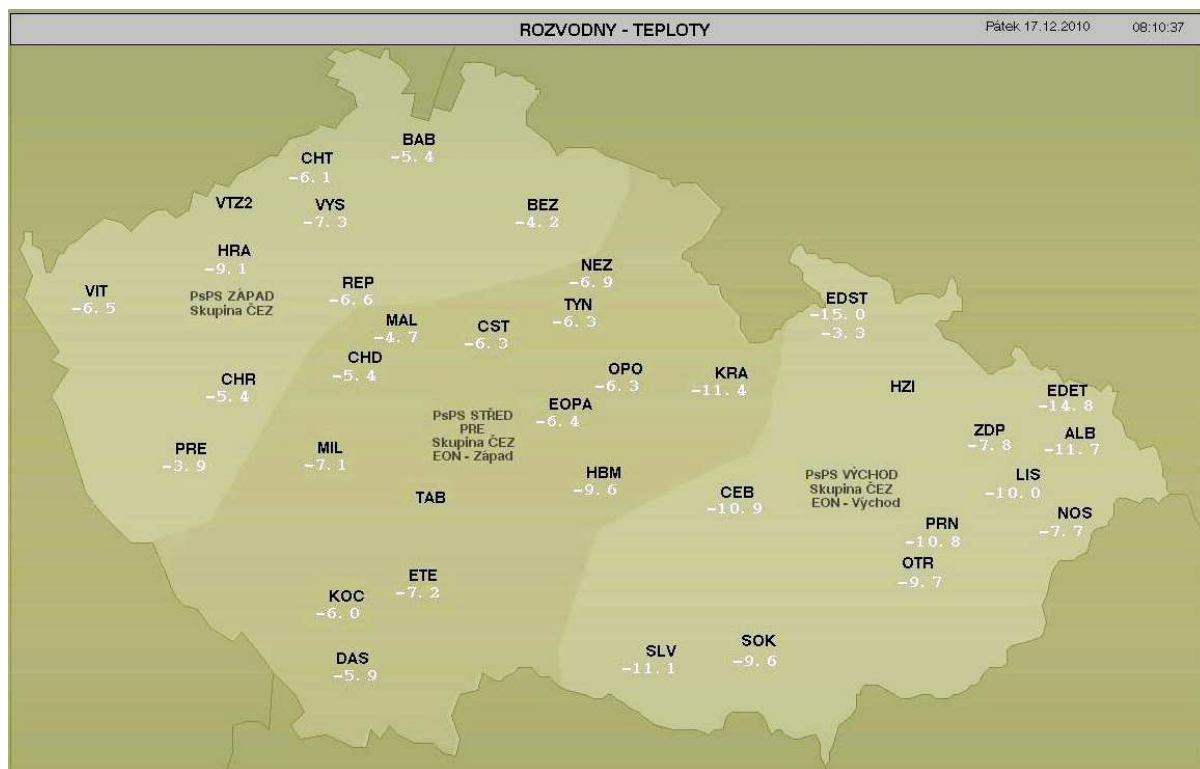
Přenosová soustava ČR má za úkol distribuci výkonů nejen mezi odběrateli naší republiky, ale je součástí celoevropského energetického systému (obr. 15). Úplné celkové přehledové schéma zapojení soustavy 220 kV a 400 kV tvoří přílohu č. 7. Aktualizace je provedena k 1. 1. 2009. Ze situace vyplývá i směr budoucího vývoje elektrizační soustavy a jejího plánovaného rozšíření.

Prostudováním schématu lze určit propojení všech provozovaných vedení a stanic. Tato skutečnost je důležitá pro stanovení správného vztahu hodnot teploty zkoumaného vedení a jeho činných ztrát.

Zpracování databáze zahájíme správnou identifikací dvou stanic a jejich propojení konkrétním vedením. Jako příklad můžeme uvést vedení V403, které spojuje dva uzly - Prosenice a Nošovice. Další vedení určíme obdobným způsobem. Správnost úprav a úplnost databáze naměřených veličin je základním předpokladem pro určení objektivní závislosti činných ztrát vedení na teplotě okolí. Databáze jsou pro každou napěťovou soustavu dvě:

- *databáze teploty*
- *databáze činných ztrát*

Databáze teplot je plněna daty z objektů společnosti ČEPS. Aktuální teplotní mapa je k dispozici na dispečerském pracovišti (obr. 16).



Obr. 16 Přehled měřených teplot v objektech ČEPS, a.s. na dispečerském pracovišti ED Ostrava

Data musí být konzistentní a porovnatelná pro zajištění objektivity při hledání výsledných závislostí a jejich náhradou pomocí polynomů. Obě tabulky tedy musí být ze stejného kalendářního měsíce a musí mít stejné intervaly odečtu. Tato základní podmínka je splněna. Příklady části databáze jsou

uvedeny v tab. 2 a tab. 3, ve kterých jsou údaje teplot okolí ve stanicích a činných ztrát vedení soustavy 400 kV v podobě, kterou poskytla společnost ČEPS. Úplný export tvoří přílohy 3 a 4.

Shodné databáze jsou k dispozici i pro soustavu 220 kV. Teplota i ztráty jsou ze shodných měsíců s intervalem odečtu čtvrt hodiny. Mohou tedy být použity pro další zpracování dat. Pro určení co nejpřesnějšího popisu hledané závislosti v celém spektru teplot, které se vyskytují na území České republiky, jsou použity údaje ze zimního i letního období. Letní měsíc je zvolen srpen roku 2009, zimní prosinec téhož roku. K dispozici jsou také údaje ztrát a teplot okolí z měsíce července 2009 a ledna 2010.

5.2 Databáze měřených teplot z energetických objektů

Databáze obsahuje naměřené hodnoty teplot ve všech objektech soustavy, které mají instalováno její měření. Množina teplot je seřazena chronologicky. Každá transformovna má přidělený třímístný kód písmen, vycházející z SJZ - systému jednotného značení (příloha 1). Lze tedy snadno dohledat velikost teploty každého objektu v konkrétní čas. Odděleně je provedeno řazení přehledu teplot ($^{\circ}\text{C}$) pro zimní a letní období ve čtvrt hodinových intervalech, které je v časovém souladu s databází naměřených ztrát. Při zpracování bylo zjištěno, že údaje teplot některých objektů nejsou k dispozici. Jedná se o protější stanice vedení směřujících do zahraničí, elektráren vyvádějících výkon do sítí ČEPS. V souvislosti s tímto zjištěním je právě u zpracování těchto vedení použit jen jeden údaj teploty. Formát tabulek teplot je uveden v tab. 2.

Datum	Čas		cALB:T_venk	cBAB:T_venk	cBEZ:T_venk	cCEB1:T_venk
	[h]		[$^{\circ}\text{C}$]	[$^{\circ}\text{C}$]	[$^{\circ}\text{C}$]	[$^{\circ}\text{C}$]
31. 7. 2009	24:00:00	L	13,51	16,29	14,09	14,38
1. 8. 2009	0:15:00	L	13,92	15,71	14,09	14,42
1. 8. 2009	0:30:00	L	14,07	15,43	14,09	14,48
1. 8. 2009	0:45:00	L	13,75	15,11	13,79	14,56
1. 8. 2009	1:00:00	L	13,75	14,84	13,5	14,58
1. 8. 2009	1:15:00	L	13,92	14,65	13,5	14,6
1. 8. 2009	1:30:00	L	13,6	14,63	13,21	14,54
1. 8. 2009	1:45:00	L	13,22	14,33	13,21	14,52
1. 8. 2009	2:00:00	L	13,25	13,9	12,62	14,34

Tab. 2 Ukázka části databáze teplot naměřených v objektech 400 kV ČEPS, a.s. [12]

Z uvedeného příkladu je zřejmé, že data jsou v syrovém stavu a bude nutné s nimi dále pracovat provedením úpravy formátu. Obdobná tabulka odpovídá naměřeným ztrátám, které jsou popsány dále.

5.3 Databáze měřených technických ztrát vedení přenosové soustavy

Databáze je složena ze soupisu chronologicky naměřených činných ztrát ($\text{MW}\cdot\text{h}$) jednotlivých vedení pro letní a zimní kalendářní měsíc. Interval odečtu je patnáct minut. Je rovněž možné sledovat aktuální hodnoty ztrát on - line na dispečerském pracovišti, jak uvádí obr. 17. Při zpracování bylo zjištěno, že údaje činných ztrát u některých vedení chybí. Tato vedení tedy nejsou zapracována. Taktéž u vedení, typicky vyvedení výkonů zdrojů, jsou údaje zkresleny skutečností vyplývající z podstaty zdrojů. Ztráty nejsou zaznamenány kontinuálně, neboť byl zdroj ve sledovaném období několikrát ve stavu vypnuto. Změna stavu zapojení zdroje do sítě se projeví zkreslením výsledné rovnice regrese, neboť ve stavu vypnuto se vedení jeví jako bezztrátové. Vývody

z elektráren, ze kterých jsou poskytnutá data také zpracována, nebudou mít správnou vypovídací schopnost.

Datum	Čas		V400:P_ztr	V401:P_ztr	V402:P_ztr	V403:P_ztr	V404:P_ztr
	[h]		[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]
31. 7. 2009	24:00:00	L	0,41	0,1	0,87	0,07	1,09
1. 8. 2009	0:15:00	L	0,87	0,54	0,36	0,06	0,55
1. 8. 2009	0:30:00	L	0,83	0,5	0,39	0,07	0,62
1. 8. 2009	0:45:00	L	0,78	0,48	0,35	0,08	0,5
1. 8. 2009	1:00:00	L	0,8	0,53	0,42	0,09	0,74
1. 8. 2009	1:15:00	L	0,73	0,45	0,28	0,08	0,6
1. 8. 2009	1:30:00	L	0,83	0,61	0,18	0,07	0,42
1. 8. 2009	1:45:00	L	0,74	0,48	0,09	0,02	0,41
1. 8. 2009	2:00:00	L	0,84	0,61	0,13	0,06	0,32

Tab. 3 Ukázka části databáze činných ztrát naměřených v objektech 400 kV ČEPS, a.s. [12]

Neupravená data jsou uvedeny v tab. 3 a budou následně upravena pro potřebu dalšího zpracování a zkoumání.

Ztráty na vedeních (Pp_ztro, Pq_ztro)

Vedení 400 kV						Vedení 220 kV					
Pp_ztro	Pq_ztro	Pp_ztro	Pq_ztro	Pp_ztro	Pq_ztro	Pp_ztro	Pq_ztro	Pp_ztro	Pq_ztro	Pp_ztro	Pq_ztro
V400	0.000	0.000	V450	1.532	0.012	V468	0.091	0.000	V201	0.356	0.028
V401	0.034	0.001	V451	0.469	0.000	V469	0.089	0.001	V202	0.012	0.021
V402	0.964	0.028	V452	0.250	0.001	V471	0.036	0.000	V203	0.395	0.086
V403	0.264	0.001	V453	0.199	0.005	V472	0.072	0.000	V204	0.085	0.120
V410	1.320	0.005	V454	0.501	0.005	V481	0.000	0.000	V205	0.042	0.000
V411	0.052	0.000	V457	0.374	0.001	V482	0.000	0.000	V206	0.048	0.004
V412	0.236	0.019	V459	0.284	0.002	V483	0.131	0.002	V207	0.582	0.151
V413	0.014	0.007	V460	0.000	0.000	V484	0.097	0.002	V208	0.002	0.029
V414	0.041	0.022	V470	0.000	0.000	V485	0.125	0.002	V209	0.022	0.003
V415	0.362	0.002	V473	0.028	0.004	V486	0.000	0.000	V210	0.028	0.038
V417	4.913	0.008	V474	0.011	0.002				V211	0.239	0.021
V418	0.110	0.083	V475	3.825	0.075	V404	0.928	0.018	V216	0.000	0.000
V420	0.000	0.000	V476	4.415	0.051	V424	1.198	0.009	V221	0.601	0.027
V422	0.795	0.019				V437	0.041	0.008	V222	0.573	0.026
V423	0.044	0.002	V051	0.319	0.009	V438	0.043	0.008	V223	1.231	0.011
V430	0.000	0.000	V052	0.326	0.001	V441	5.386	0.027	V224	1.217	0.011
V431	0.105	0.007	V462	0.061	0.002	V442	3.227	0.007	V225	0.324	0.000
V432	7.504	0.051	V463	0.000	0.000	V443	0.080	0.013	HRA	0.161	0.001
V433	0.083	0.001	V464	0.099	0.004	V444	0.608	0.044	VTZ	0.000	0.000
V434	1.496	0.001	V465	0.106	0.004	V445	1.932	0.001	VYS	0.157	0.000
V435	1.166	0.005	V466	0.887	0.005	V446	2.073	0.001	V226	0.000	0.000
V436	1.161	0.005	V467	0.020	0.001	V497	0.348	0.002	V251	0.747	0.005

Obr. 17 Přehled aktuálních ztrát na dispečerském pracovišti ED Ostrava

5.4 Zpracování datových souborů měřených veličin

V úvodu kapitoly 5 byl zmíněn zjednodušující předpoklad týkající se přesnosti údajů teploty okolí vodičů s ohledem ke skutečnosti, že se měření neuskutečňuje přímo na vodiči nebo v jeho bezprostředním okolí. Jelikož nemáme k dispozici přímo měřenou teplotu vodičů po celé jejich uvažované délce, jsou použity teploty měřené v transformovnách. Tato skutečnost nepříznivě ovlivňuje přesnost hledané závislosti. Při zpracování všech dat je rovněž zjištěno, že nejsou k dispozici údaje o teplotách všech objektů a ztrátách některých vedení. Tyto okolnosti mají vliv i na další zpracování všech dat a jejich ucelenost.

Při úpravě databáze je k výše uvedenému přihlédnuto při zpracování. Z těchto úvah vyplývají celkem tři možnosti při přípravě dat souvisejících s teplotou:

- *měřená teplota v jedné stanici*
- *měřená teplota v obou stanicích (skutečná vypočítána průměrem)*
- *měřená teplota nejbližší stanice v okolí uvažované stanice s neměřenou teplotou*

Tabulky údajů jsou tedy rozličně řešeny s ohledem na poskytnutá data. V konečném důsledku se jedná o určité zkreslení, které může narušit objektivnost. Nezávislost zhodnocení je dosažena použitím totožného matematického modelu. Pro splnění cíle nalezení závislosti ztrát na teplotě u obou přenosových napěťových hladin, je volena regrese pomocí polynomů. Zpracování probíhá v tabulkovém procesoru Excel, který disponuje funkcí matematika a grafy.

Postup pro vytvoření polynomů je následující:

1. *prostudování úplnosti databáze naměřených hodnot teplot a ztrát*
2. *zvolení vhodných teplotních pásem*
3. *vytvoření tabulek závislostí ztrát a teploty*
4. *vytvoření grafů*
5. *generování rovnic polynomů*

Pro zpracování jsou nejprve volena vedení 400 kV. Jako výchozí jsme určili jednu transformovnu 400 kV, pro příklad Bezděčín a všechna vedení z ní vycházející jsou zpracována následně popsaným způsobem. Zpracování je shodné pro letní i zimní měření. Postup pro vedení V452 v měsíci srpnu 2009 si ukážeme v následujícím textu.

Datum	Čas	cNEZ:T_venk	cBEZ:T_venk	průměr	V452:P_ztr
	[h]	[°C]	[°C]	[°C]	[MW]
1. 8. 2009	6:30:00	19,09	14,97	17,03	0,40
1. 8. 2009	6:45:00	19,40	15,26	17,33	0,39
1. 8. 2009	7:00:00	21,26	15,67	18,47	0,45
1. 8. 2009	7:15:00	22,55	15,67	19,11	0,41
1. 8. 2009	7:30:00	21,36	15,76	18,56	0,43
1. 8. 2009	7:45:00	24,07	16,52	20,30	0,47
1. 8. 2009	8:00:00	25,01	16,37	20,69	0,41
1. 8. 2009	8:15:00	25,36	15,85	20,61	0,24
1. 8. 2009	8:30:00	25,43	15,93	20,68	0,23
1. 8. 2009	8:45:00	22,36	16,05	19,21	0,26
1. 8. 2009	9:00:00	21,61	16,32	18,97	0,27

Tab. 4 Ukázka části připravené databáze naměřených hodnot pro V452

V Microsoft Office, programu Excel jsme si načetli příslušné tabulky naměřených hodnot. V tomto příkladě data teplot a ztrát vedení 400 kV za měsíc srpen 2009. Poté jsou postupně kopírována data teplot naměřené v obou objektech, tedy Bezděčín a Neznášov, a ztrát V452, do sloupců nově vytvořeného souboru s názvem vedení.

Připravenou tabulku nejprve upravíme. Všechny naměřené hodnoty budou mít jako formát buňky zvoleno číslo s přesností na dvě desetinná místa. Vytvoříme sloupec E, ve kterém bude vypočten aritmetický průměr teplot z obou objektů. V tab. 4 vidíme časovou souslednost dat, jak byla uložena na serveru. Můžeme si povšimnout, že teplota je zde neuspořádaně. Dochází k jejímu kolísání během změn teploty okolí.

Tabulka je připravena k dalšímu kroku úprav spočívající v seřazení hodnot teploty a ztrát dle zvoleného sloupce vzestupně. Vybereme tahem myši všechny sloupce a hodnoty daného seřitu. Provedeme příkaz Data - Seřadit a zvolíme seřazení dle sloupce E vzestupně. Nyní budou hodnoty teploty vzestupné. V tab. 5 je zřejmá vzestupnost teploty, zatímco datum a čas jsou již seřazeny neuspořádaně.

Datum	Čas	cNEZ:T_venk	cBEZ:T_venk	průměr	V452:P_ztr
	[h]	[°C]	[°C]	[°C]	[MW]
14. 8. 2009	0:30:00	12,44	10,75	11,60	0,70
15. 8. 2009	3:15:00	12,44	10,84	11,64	0,74
29. 8. 2009	23:15:00	11,75	11,57	11,66	0,41
19. 8. 2009	0:45:00	12,10	11,27	11,69	0,67
30. 8. 2009	7:15:00	13,81	9,58	11,70	0,22
15. 8. 2009	3:00:00	12,61	10,84	11,73	0,42
15. 8. 2009	2:45:00	12,69	10,84	11,77	0,46
24. 8. 2009	6:00:00	10,89	12,65	11,77	0,81
15. 8. 2009	2:30:00	12,71	10,84	11,78	0,46
24. 8. 2009	5:45:00	10,94	12,65	11,80	0,70
24. 8. 2009	6:15:00	10,99	12,65	11,82	0,44
15. 8. 2009	6:45:00	13,11	10,54	11,83	0,69

Tab. 5 Ukázka části seřazené databáze naměřených hodnot pro V452

Datum	Čas	cNEZ:T_venk	cBEZ:T_venk	průměr	V452:P_ztr
	[h]	[°C]	[°C]	[°C]	[MW]
1. 12. 2009	1:15:00	8,04	7,96	8,00	0,90
25. 12. 2009	5:30:00	7,52	8,52	8,02	0,28
30. 8. 2009	4:00:00	7,83	8,23	8,03	0,17
1. 12. 2009	6:30:00	9,74	6,44	8,09	0,81
25. 12. 2009	6:00:00	7,60	8,58	8,09	0,29
30. 8. 2009	6:45:00	8,87	7,35	8,11	0,42
25. 12. 2009	5:15:00	7,44	8,81	8,13	0,31
30. 8. 2009	3:45:00	8,29	8,05	8,17	0,17
25. 12. 2009	5:45:00	7,50	8,84	8,17	0,30
25. 12. 2009	6:15:00	7,50	8,87	8,19	0,31
1. 12. 2009	7:45:00	9,36	7,14	8,25	0,58
30. 8. 2009	3:30:00	8,49	8,05	8,27	0,20

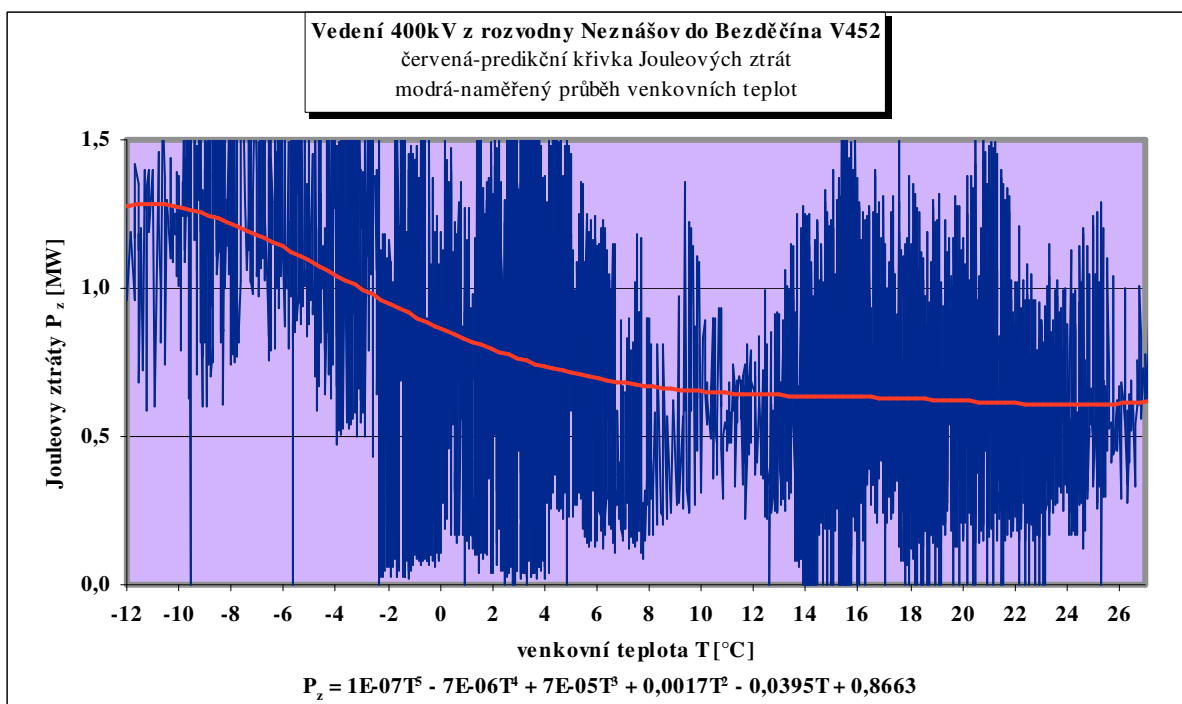
Tab. 6 Ukázka průniku databází letních a zimních naměřených hodnot pro V452 při vzestupném řazení dle teploty

Tímto postupem získáme seřazení ztrát sledovaného vedení v daném období v závislosti na průměrné teplotě. Uvedený způsob úprav je aplikován pro ostatní vedení 400 a 220 kV, pro letní i zimní měsíc v samostatných souborech, tabulkách a listech. Databáze je upravena a my získáme přehled o spektrech teplot a ztrát, které byly naměřeny.

Závěrem úprav vytvoříme souhrnnou tabulku s grafem zahrnujícím teploty a ztráty v zimním i letním období. Postup pro její tvorbu je obdobný jako při zpracování letního i zimního období. Jako vstupní data použijeme upravená data z letního a zimního měsíce, která zkopírujeme do nového listu a seřadíme dle teploty.

V konečné tab. 6 je možné si všimnout zajímavé okolnosti teploty kolem 8 °C, kdy dochází k průniku dat z nejteplejšího zimního a nejchladnějšího letního měřeného časového okamžiku. Rovněž je vidět skokový rozdíl v hodnotách ztrát. Šedým podbarvením jsou data ze zimního měření, bílým z letního. V souhrnné tabulce na závěr ještě doplníme jednotky veličin.

Můžeme přistoupit k vypracování grafu a vygenerování regresního polynomu. Postup tvorby grafu je jednoduchý neliší se od běžně vytvářených grafů v Excelu. Vybereme graf typu „XY bodový“ a volíme podtyp „Bodový a datovými body spojenými pomocí spojnic a bez značek“. Volbou zájmové oblasti dat nám Excel zobrazí výsledný průběh grafu. Provedeme úpravu vhodnou volbou popisu os a názvu.



Graf 1 Průběh regresní křivky polynomem 5. stupně a výsledný vzorec závislosti činných ztrát na venkovní teplotě V452

Genezi vzorce a volbu typu regrese provedeme kliknutím myši na regresní křivku. Vybereme regresi polynomem zvoleného stupně a ta se nám zobrazí v oblasti grafu. Rovnice regrese se nám vygeneruje obecně ve formě (graf 1):

$$y = 1E-07x^5 - 7E-06x^4 + 7E-05x^3 + 0,0017x^2 - 0,0395x + 0,8663 \quad [5.1]$$

Výše uvedený tvar není pro další práci dostatečně vypovídající. Upravíme tvar rovnice do podoby konkrétních fyzikálních veličin. Osa y představuje hodnotu činných ztrát vedení P_z a osa x má fyzikální význam teploty okolí T . Po úpravě tedy dostaneme tento tvar:

$$P_z = 1 \cdot 10^{-7} \cdot T^5 - 7 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 + 7 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 + 0,0017 \cdot T^2 - 0,0395 \cdot T + 0,8663 \quad [5.2]$$

Vygenerovaný polynom souhrnných hodnot použijeme jako náhradu pro výpočet predikce ztrát v závislosti na zvolené teplotě okolí.

5.5 Popis upravených datových souborů vedení 400 kV

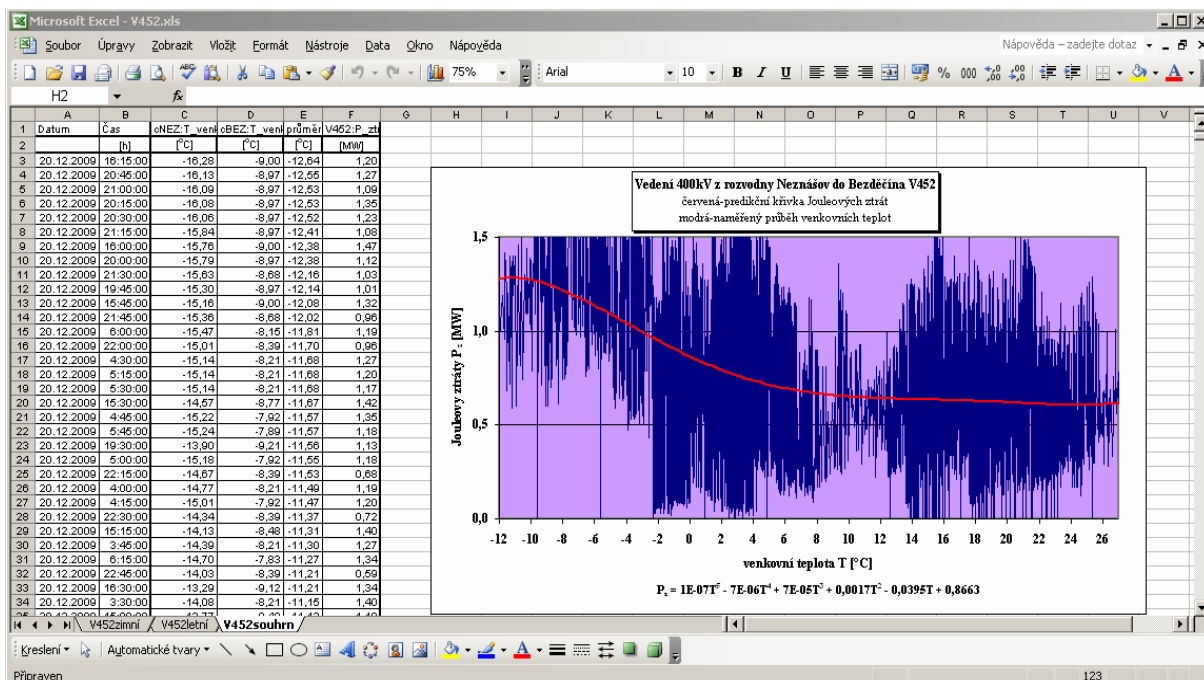
Pro přenosová vedení 400 kV i 220 kV byl použit postup zpracování dle kapitoly 5.4. Tabulky a grafy všech vedení jsou tvořeny samostatnými soubory, tvořenými listy s názvem vedení. Listy jsou rozděleny do tří částí ve formátu Včíslovedenídoplňujícíúdaj:

- *Vxxxzimní*
- *Vxxxletní*
- *Vxxxsouhrn*

Doplňujícím údajem rozumíme rozlišení, zda se jedná o zimní, letní naměřené hodnoty, nebo souhrnné hodnoty z obou období. Ve všech třech upravených tabulkách je závislost činných ztrát na teplotě okolí seřazena vzestupně od nejnižších teplot po nejvyšší.

Jednotlivá vedení se mohou odlišovat v pohledu zpracování teploty okolí. V některých případech je u uvažovaného vedení použita jen jedna hodnota teploty stanice, u zbylých je uvažována průměrná teplota určená ze dvou stanic, spojených právě těmito vedeními. Vycházíme z reálné databáze společnosti ČEPS, která nemá měření umístěno ve všech svých objektech.

Data činných ztrát jsou jednoznačně určena měřeními na konkrétním vedení. Tato již nejsou vzestupně a z průběhu jejich vývoje po vzestupném seřazení teploty okolí je vytvořen graf.



Obr. 18 Příklad upraveného datového souboru pro V452

Cílem je vytvoření popisu závislosti matematickou regresí pomocí polynomu, který je umístěn pod grafem. Analýzou diferencí ztrát predikovaných vůči skutečným se zabývá kapitola 7. Vzorek upraveného datového souboru pro vedení 400 kV je uveden na obr. 18. Celková teplota okolí je v tomto konkrétním případě vyčíslena aritmetickým průměrem dvou stanic.

Na závěr popisu uvádíme zjištěnou skutečnost chybějících dat činných ztrát pro vedení V051, V052. Rovněž není zpracováno vedení V457 elektrárna Dlouhé stráně – rozvodna Krasíkov, kde nejsou úplná data o ztrátách, neboť tento objekt funguje jako přečerpávací elektrárna. Tato vedení nejsou zpracována.

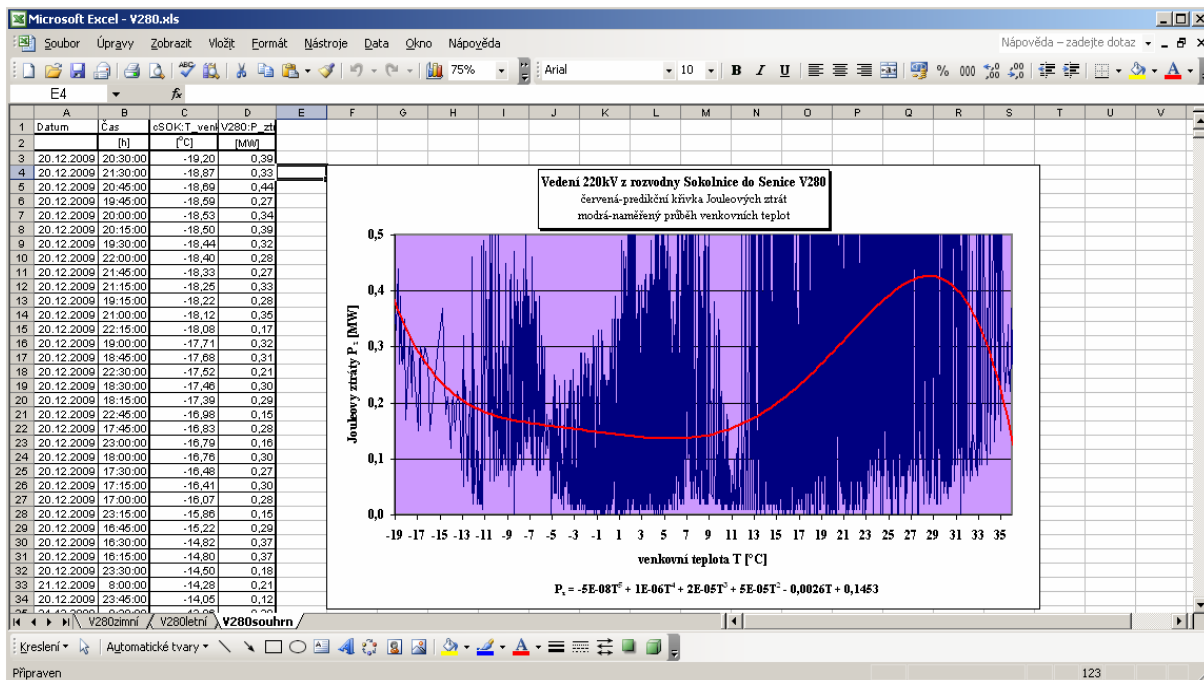
5.6 Popis upravených datových souborů vedení 220 kV

Pro přenosová vedení 220 kV byl použit postup zpracování shodný jako v případě příkladu zpracování vedení 400 kV. Grafy a tabulky jsou samostatnými soubory s listy s názvy vedení. Listy jsou rozděleny do tří částí ve formátu VVNČíslovedenídoplňujícíúdaj:

- Vxxxzimní
- Vxxxletní
- Vxxxsouhrn

Názvy doplňujících údajů mají stejná pravidla jako u napěťové hladiny 400 kV. Seřazení závislosti činných ztrát na teplotě je obdobné, tedy vzestupně od nejnižších hodnot teploty daného rozlišení po nejvyšší.

Pro zpracování teploty okolí mohou nastat oba případy uvedené v kapitole 5.4. V některých případech je u uvažovaného vedení použita jen jedna hodnota teploty stanice, u zbylých je uvažována průměrná teplota určená ze dvou stanic, spojených právě těmito vedeními. U napěťové hladiny VVN 220 kV je ve většině vedení uvažována jedna teplota okolí, neboť tyto stanice nejsou vybaveny měřením teploty v takovém rozsahu jako v případě stanic 400 kV.



Obr. 19 Příklad upraveného datového souboru pro V280

Data činných ztrát jsou jednoznačně určena měřením na konkrétním vedení. Tato již nejsou vzestupná a z průběhu jejich vývoje po vzestupném seřazení teploty okolí je vytvořen graf.

Cílem je vytvoření popisu závislosti matematickou regresí pomocí polynomu, který je umístěn pod grafem. Analýza diferencí ztrát predikovaných vůči skutečným je řešena v kapitole 7. Vzorek upraveného datového souboru pro vedení 220 kV je uveden na obr. 19.

Na závěr popisu uvádíme zjištěnou skutečnost chybějících dat činných ztrát pro vedení V001, V002, V011, V017, V018, V226T. Tato nejsou zpracována.

6 Stanovení matematických závislostí pro predikci ztrát u vedení přenosové soustavy

Pro stanovení vhodných matematických nahrazení závislosti ztrát na teplotě okolí vycházíme z teorie kapitoly 4, kde jsou uvedeny některé možné varianty matematických náhrad hledané závislosti. Nyní popíšeme jednotlivé závislosti podrobněji a pro konkrétní vedení. Porovnání vhodnosti jednotlivých rovnic regrese je v dalším popsáno pro vedení V418. U tohoto vedení jsou příklady čtyř zvolených regresí.

6.1 Možnosti výběru funkcí pro predikce

Regrese přímkou

Nahrazení závislosti přímkou se používá nejčastěji u fyzikálních jevů, které jsou lineární a mají ideální, téměř laboratorní podmínky. Jedná se o jednoduché jevy, při kterých můžeme pro zjednodušení zanedbat vnější vlivy působící na něj. Z praxe můžeme uvést např. vertikální pohyb tělesa z určité výšky, kdy pro zjednodušení berem v úvahu hmotnost tělesa a gravitační zrychlení. Tento model závislosti u tak složitého procesu, kterým je přenos elektrické energie, je už i pocitově nevhodný k jejímu popisu.

Popis přímkové závislosti ztrát a teploty:

$$P_z = a + b \cdot T \quad [6.1]$$

Pro V418 konkrétně bude mít rovnice toto znění:

$$P_z = 0,2713 - 0,0031 \cdot T \quad [6.2]$$

Průběh grafu pro tuto regresi je znázorněn na grafu 2.

Regrese kvadratickou rovnicí

Tato možnost nebude řešena z důvodu očekávané malé přesnosti prognózy ztrát.

Popis kvadratickou rovnicí by měl tento tvar:

$$P_z = a + b \cdot T + c \cdot T^2 \quad [6.3]$$

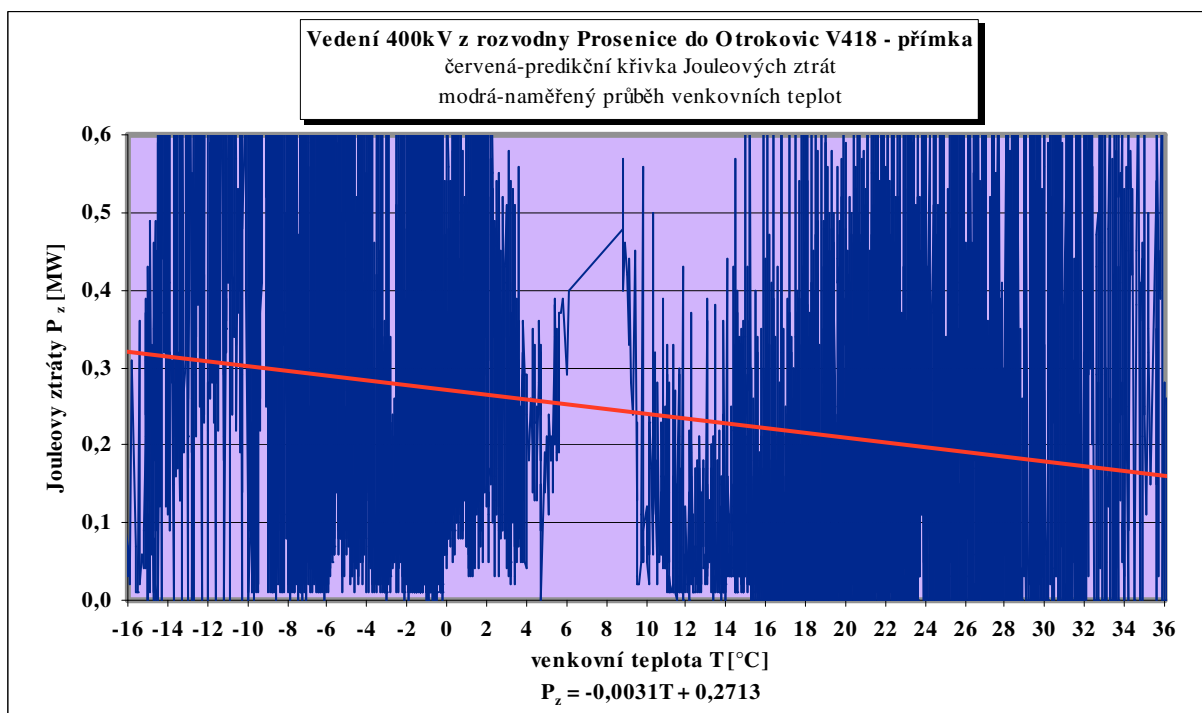
Její tvar v podstatě odpovídá polynomu 2. stupně, ale tento stupeň bude málo přesný, proto se jím nebudeme dále zabývat.

Regrese polynomem 3. stupně

Popis hledané závislosti polynomem je obecně vzato vhodný. Lze s ním dobře popsat nelineární děje, neboť s užitím mocnin n stupňů můžeme proložit naměřená data vhodnou funkcí. Přesnost popisu je dána stupněm polynomu. Čím vyšší stupeň, tím vyšší přesnosti dosáhneme. S přibývajícím stupněm se ovšem stává výpočet složitějším. Není tedy vhodné volit co nejvyšší možný stupeň regrese, protože i přesnost se nebude od určitého stupně zvyšovat, a pro naše účely již nebude rozhodující.

Popis polynomem 3. stupně:

$$P_z = a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3 \quad [6.4]$$



Graf 2 Průběh regresní křivky přímkou a výsledný vzorec závislosti činných ztrát na venkovní teplotě V418

Pro ZVN418:

$$P_z = 0,2446 - 0,0124 \cdot T + 0,0003 \cdot T^2 + 4 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 \quad [6.5]$$

Průběh grafu pro tuto regresi je znázorněn na grafu č. 3.

Regrese polynomem 5. stupně

V programu Excel je možné dosáhnout nejvýše polynomu 5. stupně. Tento můžeme považovat za nej přesnější regresi a budeme jej dále porovnávat s ostatními.

Popis polynomem 5. stupně:

$$P_z = a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3 + e \cdot T^4 + f \cdot T^5 \quad [6.6]$$

Pro ZVN418:

$$P_z = 0,2344 - 0,0205 \cdot T + 0,0006 \cdot T^2 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 - 2 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 + 3 \cdot 10^{-8} \cdot T^5 \quad [6.7]$$

Průběh grafu pro tuto regresi je znázorněn na grafu č. 4.

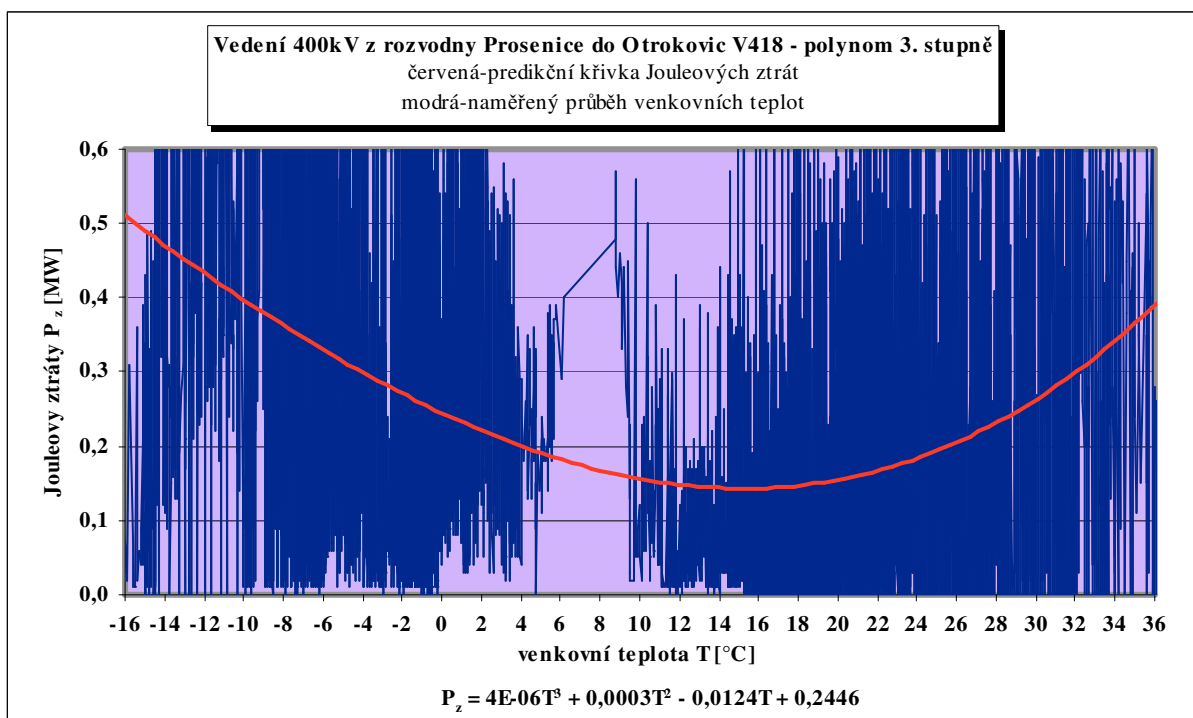
Regrese exponenciální funkcí

Exponenciální funkce je nevhodná pro svůj úzce vymezený význam. Nejde jí vhodně popsat tvar křivky hledané závislosti technických ztrát na teplotě okolí.

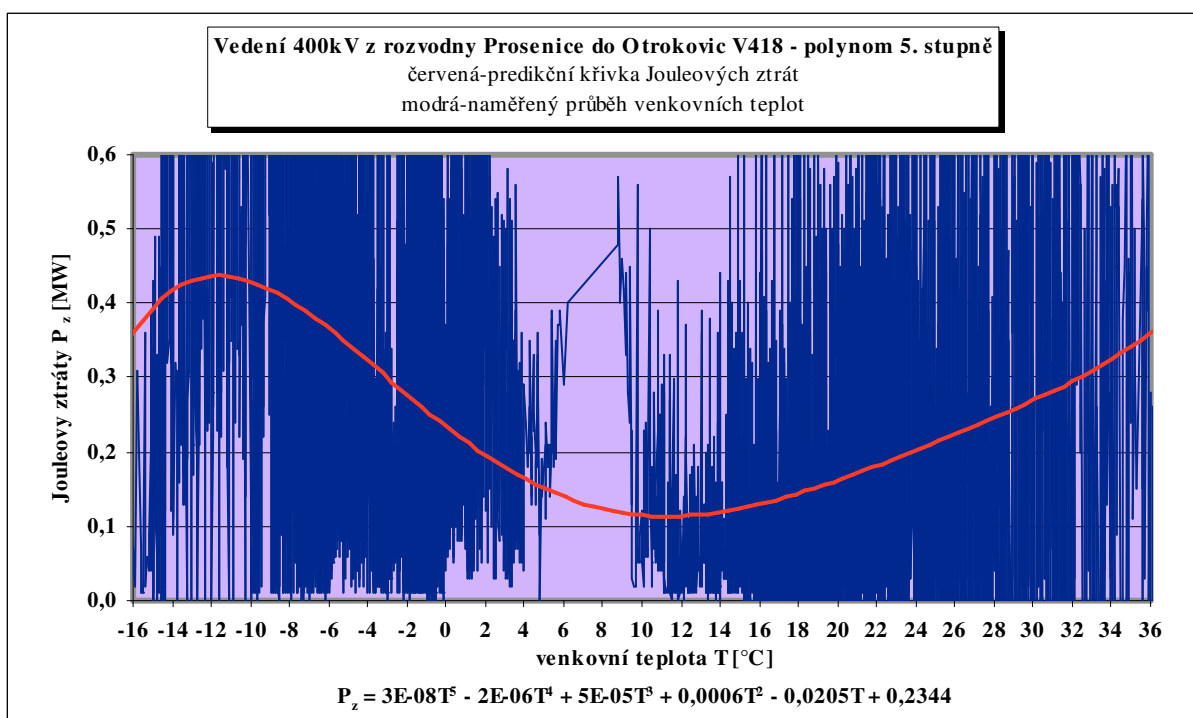
Popis by měl tuto podobu:

$$P_z = a \cdot b^T \quad [6.8]$$

Touto regresí se nebudeme dále zabývat.



Graf 3 Průběh regresní křivky polynomem 3. stupně a výsledný vzorec závislosti činných ztrát na venkovní teplotě V418

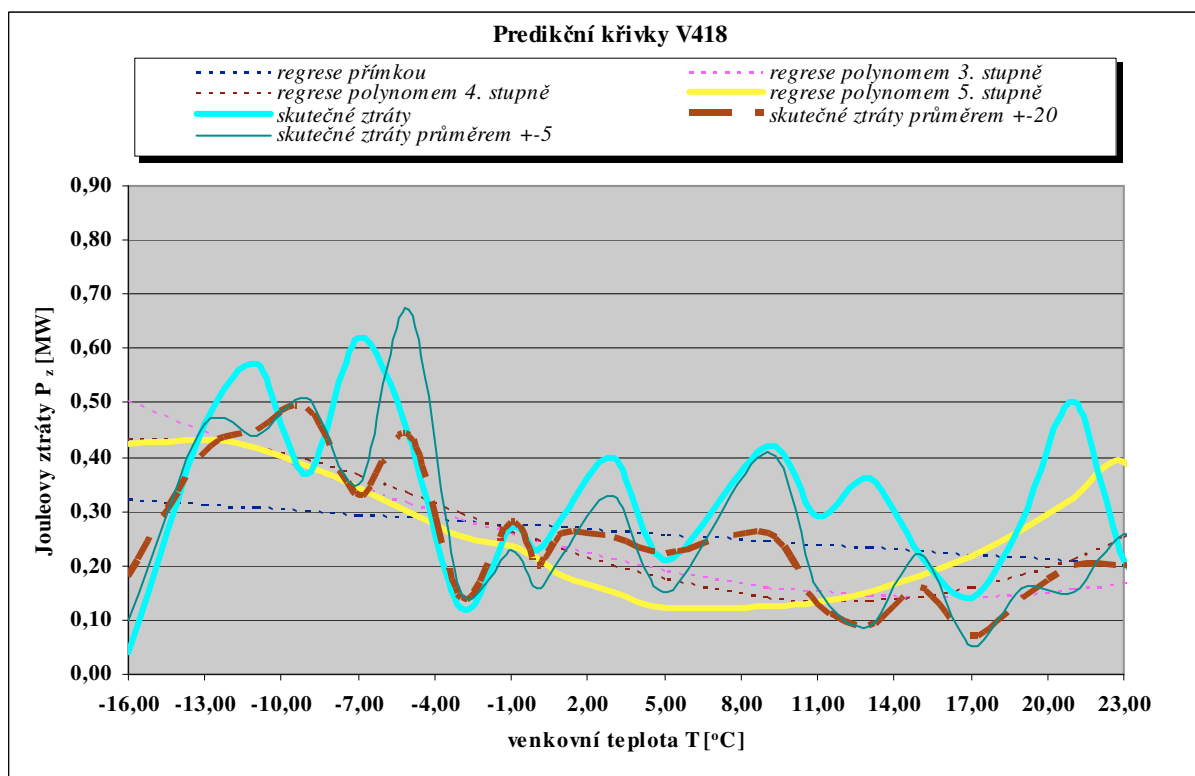


Graf 4 Průběh regresní křivky polynomem 5. stupně a výsledný vzorec závislosti činných ztrát na venkovní teplotě V418

6.2 Optimální vybraná polynomičká funkce

Určit obecně, která z uvedených regresních funkcí je nejvhodnější lze subjektivně citem a objektivně porovnáním dosažené přesnosti. Nezávislé zhodnocení přesnosti uvedených regresí dosáhneme vynesemím všech regresí do jednoho grafu. Takto si už můžeme udělat první představu o přesnosti jednotlivých matematických metod výpočtu ztrát. V grafu 5 jsou vyneseny vypočítané hodnoty ztrát pomocí polynomů a původní regrese zpracované dle 5.4. V legendě grafu je označeno barevně, která metody výpočtu ztrát je použita. Nejvěrněji se přibližuje proloženému průběhu skutečných ztrát žlutě značená křivka (graf 4). Je výsledkem výpočtu ztrát polynomem 5. stupně a poměrně věrně jej kopíruje. Použití polynomu 5. stupně se jeví jako neoptimálnější.

Následně můžeme vyhodnotit velikosti relativních chyb mezi skutečnými měřeními a predikovanými ztrátami v tabulce. Jejich porovnání je provedeno v kapitole 7. Tabulku vytvoříme zvolením vhodné škály teplot a odečteme hodnoty relativních chyb ztrát jednotlivých prognóz. Pro toto spektrum teplot vypočítáme ztráty a funkce, které se budou nejvíce blížit skutečně naměřeným hodnotám, jsou nejvhodnější.



Graf 5 Průběh regresních křivek V418

7 Analýza měřených technických ztrát a ztrát predikovaných

V této části se zaměříme na porovnání predikovaných a naměřených ztrát. Vzhledem k obsáhlosti a počtu hledaných závislostí není porovnání provedeno u všech vedení přenosové soustavy. Porovnání je zvoleno pro náhodně vybrané vedení 220 kV i 400 kV. S ohledem k unifikovanému postupu při hledání závislosti je pravděpodobné, že u ostatních vedení bude dosaženo stejných hodnot přesnosti i chyb. Pro objektivnost jsou vybrána vedení se známými ztrátami, která nejsou atypická a mají dopočítanou teplotu okolí z průměru dvou stanic, které propojují.

Nejprve zvolíme vedení 220 kV, která budou analyzována. Vedení pro tuto napěťovou hladinu jsou volena V251 ze stanice Prosenice (400/220/110 kV) do Sokolnic (400/220/110 kV). Další vybrané vedení je V253 z Prosenic do Lískovce (220/110 kV). Vedení dosahuje standardní délky a propojuje dvě stanice, ze kterých máme k dispozici data teploty okolí i ztrát.

Obdobně je vybráno i vedení 400 kV. V418 propojuje stanice Prosenice a Otrokovice (400/110 kV). Druhé zvolené vedení je V417 z Otrokovic do Sokolnic.

Pro zvolená vedení vytvoříme grafy regrese polynomů 3. a 4. stupně a přímky. Vygenerujeme pro ně rovnice regrese a spolu s již vytvořeným polynomem 5. stupně zhotovíme tabulku. Zvolíme vhodné teplotní spektrum, ve kterém jsou k dispozici naměřené hodnoty ztrát, a výpočtem vyčíslíme teoreticky jejich hodnotu použitím regrese pomocí polynomů a přímky. Z rozdílů naměřených a vypočítaných hodnot určíme relativní chybu a vše zaznamenáme v tabulce. Vyčíslíme průměrnou relativní chybu, která bude určující pro stanovení vhodnosti použité regrese. Teploty budou voleny s ohledem ke skutečným naměřeným. Hodnoty teplot tedy nejsou vždy celá čísla, protože data jsou dána časovým okamžikem odečtu čidly a zápisu do řídicího systému.

Grafy sestojíme tak, aby bylo možné sledovat rozdíly mezi hodnotami konkrétních regresí. V jednom grafu jsou průběhy ztrát vypočítaných polynomy 5., 4. a 3. stupně a rovnicí přímky.

Hodnota skutečných ztrát je volena z tabulky dvěma způsoby. První spočívá v určení jedné hodnoty ztrát nejbližší zvolené teplotě. Druhá metoda je pracnější a počítá s více hodnotami ztrát v okolí zvolené teploty okolí. Počítá s \pm dvaceti hodnotami oběma směry od vztažné teploty. Z nich je poté vytvořen aritmetický průměr, který hodnoty ztrát přibližuje ztrátám vypočítaných polynomů. Tímto způsobem zpřesněná hodnota ztrát odpovídá výslednému polynomu, uvedenému rovněž v tabulkách.

7.1 Rozbor predikovaných a skutečných ztrát u vedení 220 kV

Pro vybraná vedení V251 a V253 jsme nahradili závislost ztrát na teplotě zvolenými regresemi, uvedenými níže. Připojen je i graf ztrát skutečných a predikovaných pomocí všech užitých regresí.

V251

Náhrada průběhu ztrát polynomem 5. stupně:

$$P_z = 0,1319 + 0,0221 \cdot T + 0,0015 \cdot T^2 - 4 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 - 3 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 + 7 \cdot 10^{-8} \cdot T^5 \quad [7.1]$$

Náhrada průběhu ztrát polynomem 4. stupně:

$$P_z = 0,1514 + 0,0294 \cdot T + 0,0007 \cdot T^2 - 8 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 + 1 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 \quad [7.2]$$

Náhrada průběhu ztrát polynomem 3. stupně:

$$P_z = 0,1513 + 0,0219 \cdot T + 0,0007 \cdot T^2 - 3 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 \quad [7.3]$$

Náhrada průběhu ztrát přímkou:

$$P_z = -0,0135 \cdot T + 0,1813$$

[7.4]

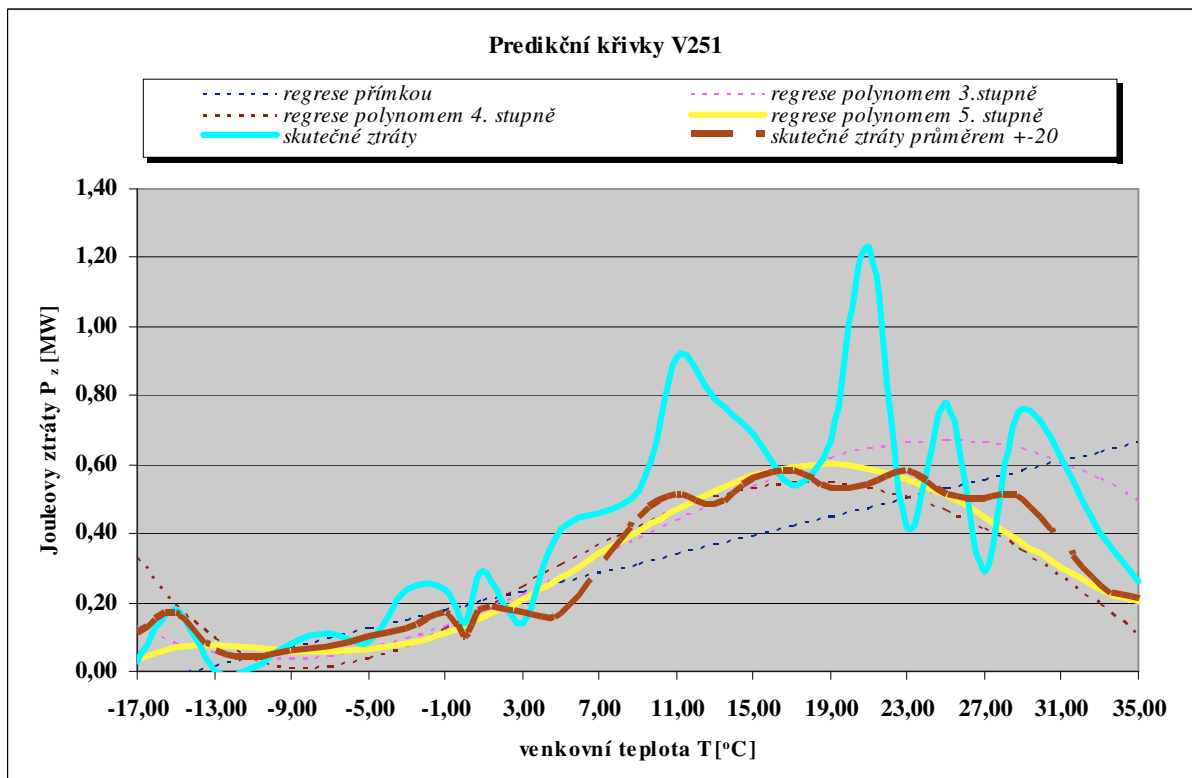
Těmito rovnicemi provedeme výpočet v tabulce ztrát (tab. 7). Spektrum teplot je zvoleno v rozmezí od -17,01 °C do +35,04 °C.

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot ztrát V251							
Teplota	hodnoty ztrát +-20 od zadané teploty	skutečná hodnota ztrát	přímka	polynom 3. stupně	polynom 4. stupně	polynom 5. stupně	výsledný polynom
[°C]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]
-17,01	0,11	0,03		0,13	0,33	0,04	0,18
-15,01	0,17	0,18	-0,01	0,08	0,19	0,07	0,14
-13,00	0,06	0,00	0,01	0,05	0,09	0,07	0,11
-11,01	0,04	0,01	0,04	0,04	0,03	0,07	0,08
-9,03	0,06	0,08	0,07	0,03	0,01	0,06	0,07
-7,01	0,07	0,11	0,09	0,04	0,01	0,06	0,06
-5,00	0,10	0,09	0,12	0,06	0,03	0,06	0,07
-2,99	0,12	0,24	0,15	0,09	0,07	0,08	0,09
-1,00	0,17	0,24	0,17	0,13	0,12	0,11	0,12
0,01	0,10	0,14	0,19	0,15	0,15	0,13	0,14
1,00	0,18	0,29	0,20	0,17	0,18	0,16	0,17
3,00	0,17	0,14	0,23	0,22	0,24	0,21	0,22
5,01	0,17	0,41	0,26	0,27	0,31	0,27	0,27
9,00	0,45	0,52	0,31	0,38	0,42	0,41	0,39
11,00	0,51	0,91	0,34	0,44	0,47	0,47	0,44
13,00	0,48	0,79	0,36	0,49	0,50	0,53	0,50
15,00	0,56	0,69	0,39	0,54	0,53	0,57	0,54
17,00	0,58	0,54	0,42	0,58	0,54	0,59	0,58
19,00	0,53	0,67	0,44	0,61	0,54	0,60	0,61
21,00	0,54	1,23	0,47	0,64	0,53	0,59	0,62
23,00	0,58	0,42	0,50	0,66	0,50	0,56	0,63
25,00	0,51	0,78	0,53	0,67	0,46	0,51	0,63
27,00	0,50	0,29	0,55	0,66	0,41	0,44	0,62
29,00	0,50	0,76	0,58	0,64	0,35	0,37	0,60
33,02	0,25	0,40	0,63	0,56	0,19	0,24	0,58
35,04	0,21	0,26	0,66	0,49	0,11	0,20	0,58

Tab. 7 Výsledná tabulka vypočtených hodnot ztrát pro V251

Ve výsledném grafu 6 pro hodnoty z tab. 7 jsou v legendě popsány použité regrese. Je patrný plynulý průběh hodnot ztrát pomocí polynomu 5. stupně (žlutě). Čárkované jsou označeny méně vhodné regrese. Při použití jedné hodnoty ztrát při zvolené teplotě (azurová) vidíme velké výkyvy, které oscilují kolem střední hodnoty polynomu 5. stupně. Nejvyšší rozdíly ztrát jsou při 11,00 °C a 19,00 °C, kdy dosahují skutečné ztráty i dvounásobné hodnoty ztrát predikovaných polynomem 5. stupně. S menšími rozdíly obou hodnot jsou teplotní spektra od -13 °C do 7 °C a v kladné části osy mezi 23 °C - 35 °C.

Při použití průměru ztrát z více hodnot, zde ± 20 hodnot od zvolené teploty (silná hnědá), je zřejmé zpřesnění průběhu ztrát v závislosti na teplotě.



Graf 6 Průběh regresních křivek V251

V253

Náhrada průběhu ztrát polynomem 5. stupně:

$$P_z = 0,3097 + 0,0008 \cdot T + 0,00004 \cdot T^2 - 3 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 - 7 \cdot 10^{-7} \cdot T^4 + 2 \cdot 10^{-8} \cdot T^5 \quad [7.5]$$

Náhrada průběhu ztrát polynomem 4. stupně:

$$P_z = 0,3177 + 0,0026 \cdot T - 0,0002 \cdot T^2 - 5 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 + 2 \cdot 10^{-7} \cdot T^4 \quad [7.6]$$

Náhrada průběhu ztrát polynomem 3. stupně:

$$P_z = 0,316 + 0,0006 \cdot T - 0,0002 \cdot T^2 + 4 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 \quad [7.7]$$

Náhrada průběhu ztrát přímkou:

$$P_z = -0,0009 \cdot T + 0,3002 \quad [7.8]$$

Výsledná tabulka vypočtených a naměřených ztrát je uvedena dále (tab. 8). Spektrum teplot je v rozmezí od $-16,98^\circ\text{C}$ do $+35,93^\circ\text{C}$.

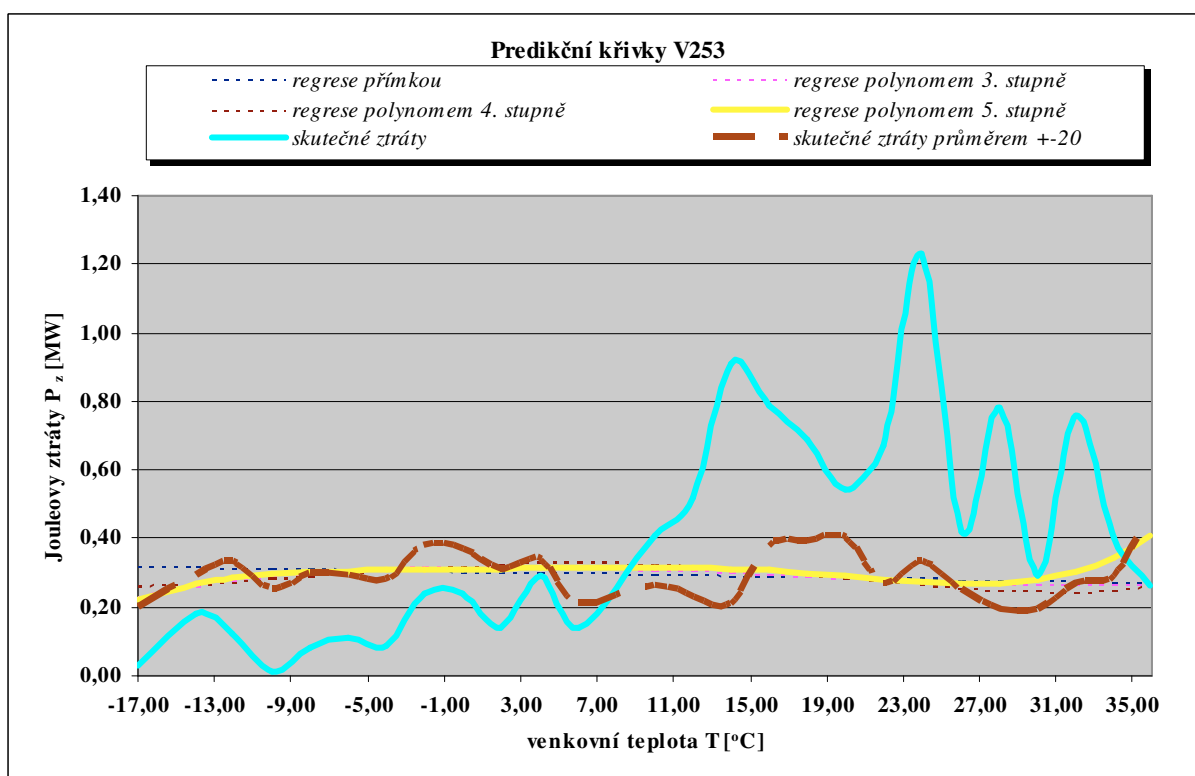
Konečný průběh pro V253 má jiný tvar než v případě V251 i přesto, že se jedná o vedení stejné napěťové hladiny (graf 7). Ve výsledném grafu jsou v legendě popsány použité regrese. Čárkovaně jsou označeny méně vhodné regrese. Při použití jedné hodnoty ztrát při zvolené teplotě (azurová) jsou vidět velké výkyvy, které oscilují kolem střední hodnoty polynomu 5. stupně. Nejvyšší

rozdíly ztrát jsou při 14,00 °C a 24,00 °C, kdy dosahují skutečné ztráty hodnotu trojnásobku ztrát predikovaných polynomm 5. stupně.

Při použití průměru ztrát z více hodnot, zde ± 20 hodnot od zvolené teploty (silná hnědá), je zřejmé zpřesnění průběhu ztrát v závislosti na teplotě.

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot ztrát V253							
Teplota	hodnoty ztrát ± 20 od zadané teploty	skutečná hodnota ztrát	přímka	polynom 3. stupně	polynom 4. stupně	polynom 5. stupně	výsledný polynom
[°C]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]
-16,98	0,20	0,03	0,32	0,23	0,26	0,22	0,23
-14,00	0,29	0,18	0,31	0,26	0,26	0,27	0,31
-12,04	0,33	0,00	0,31	0,27	0,27	0,29	0,33
-10,00	0,25	0,01	0,31	0,29	0,28	0,30	0,33
-8,00	0,30	0,08	0,31	0,30	0,29	0,30	0,32
-6,00	0,29	0,11	0,31	0,30	0,30	0,31	0,31
-4,00	0,28	0,09	0,30	0,31	0,30	0,31	0,30
-2,00	0,38	0,24	0,30	0,31	0,31	0,31	0,29
0,00	0,37	0,24	0,30	0,32	0,32	0,31	0,29
1,99	0,31	0,14	0,30	0,32	0,32	0,31	0,29
4,01	0,34	0,29	0,30	0,32	0,32	0,31	0,29
6,01	0,21	0,14	0,29	0,31	0,33	0,32	0,30
10,05	0,26	0,41	0,29	0,31	0,32	0,32	0,32
12,00	0,23	0,52	0,29	0,30	0,32	0,32	0,33
14,00	0,21	0,91	0,29	0,30	0,31	0,31	0,34
16,00	0,38	0,79	0,29	0,29	0,30	0,31	0,35
18,00	0,39	0,69	0,28	0,29	0,29	0,30	0,36
20,00	0,40	0,54	0,28	0,28	0,28	0,29	0,36
22,00	0,27	0,67	0,28	0,27	0,27	0,28	0,37
24,00	0,33	1,23	0,28	0,27	0,26	0,27	0,38
26,00	0,25	0,42	0,28	0,27	0,25	0,27	0,39
28,00	0,19	0,78	0,28	0,26	0,25	0,27	0,42
30,00	0,19	0,29	0,27	0,26	0,24	0,28	0,46
32,00	0,27	0,76	0,27	0,26	0,24	0,30	0,54
34,01	0,29	0,40	0,27	0,26	0,25	0,34	0,65
35,93	0,47	0,26	0,27	0,26	0,25	0,41	0,81

Tab. 8 Výsledná tabulka vypočtených hodnot ztrát pro V253



Graf 7 Průběh regresních křivek V253

7.2 Rozbor predikovaných a skutečných ztrát u vedení 400 kV

Pro zvolená vedení V417 a V418 aplikujeme podobný postup jako v případě řešení vedení 220 kV. Opět jsou pro objektivnost použity regrese polynomy 5., 4., 3. stupně a přímkové závislosti, ze kterých jsou vypočítány predikované ztráty a vytvořen vygenerován graf.

V417

Náhrada průběhu ztrát polynomem 5. stupně:

$$P_z = 1,1197 + 0,0378 \cdot T - 0,0044 \cdot T^2 - 7 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 - 1 \cdot 10^{-5} \cdot T^4 - 2 \cdot 10^{-7} \cdot T^5 \quad [7.9]$$

Náhrada průběhu ztrát polynomem 4. stupně:

$$P_z = 1,0362 + 0,0221 \cdot T - 0,0018 \cdot T^2 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 + 1 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 \quad [7.10]$$

Náhrada průběhu ztrát polynomem 3. stupně:

$$P_z = 1,0247 + 0,0131 \cdot T - 0,0017 \cdot T^2 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 \quad [7.11]$$

Náhrada průběhu ztrát přímkou:

$$P_z = -0,0076 \cdot T + 0,8714 \quad [7.12]$$

Zhotovíme tabulku vypočtených ztrát (tab. 9). Spektrum teplot je v rozmezí od $-15,06^\circ\text{C}$ do $+23^\circ\text{C}$ a vyčíslíme hodnoty ztrát regresemi.

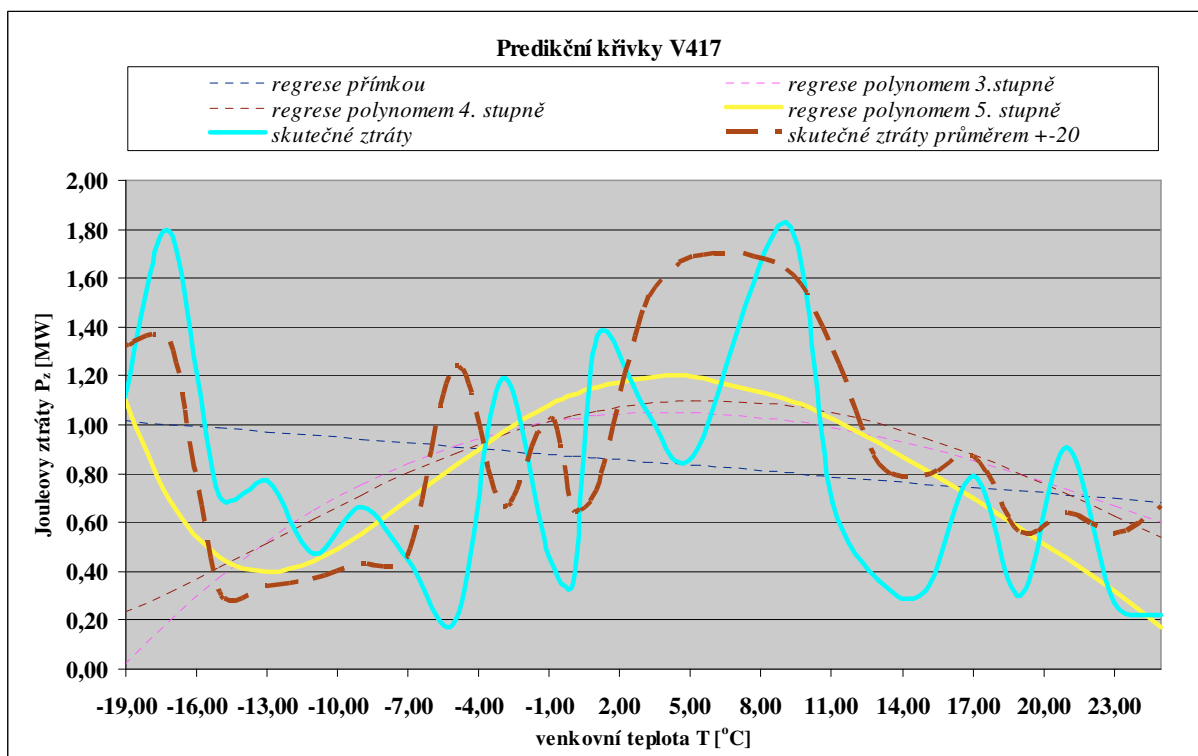
Ve výsledném grafu pro tab. 9 jsou v legendě popsány použité regrese (graf 8). Je patrný hladký průběh ztrát pomocí polynomu 5. stupně (žlutě). Čárkovaně jsou označeny méně vhodné

regrese. Při použití jedné hodnoty ztrát při zvolené teplotě (azurová) vidíme velké výkyvy, které oscilují kolem střední hodnoty polynomu 5. stupně. Nejvyšší rozdíly ztrát jsou kolem 0 °C, kdy dosahují skutečné ztráty asi třetinové hodnoty ztrát predikovaných polynomem 5. stupně. S menšími rozdíly obou hodnot jsou teplotní spektra od -13 °C do přibližně 7 °C a v kladné části osy v rozmezí 14 °C až 23 °C.

Při použití průměru ztrát z více hodnot, zde ± 20 hodnot od zvolené teploty (silná hnědá), je zřejmé zpřesnění průběhu ztrát v závislosti na teplotě.

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot ztrát V417							
Teplota	hodnoty ztrát ± 20 od zadané teploty	skutečná hodnota ztrát	přímka	polynom 3. stupně	polynom 4. stupně	polynom 5. stupně	výsledný polynom
[°C]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]
-15,06	0,31	0,71	0,99	0,37	0,41	0,46	0,76
-13,00	0,34	0,77	0,97	0,52	0,52	0,40	0,52
-11,00	0,37	0,47	0,96	0,65	0,62	0,44	0,42
-9,00	0,43	0,66	0,94	0,75	0,71	0,55	0,43
-7,00	0,46	0,45	0,92	0,84	0,80	0,69	0,51
-5,00	1,24	0,20	0,91	0,91	0,88	0,84	0,65
-3,00	0,66	1,19	0,89	0,97	0,95	0,97	0,82
-1,00	1,03	0,46	0,88	1,01	1,01	1,08	1,00
0,00	0,65	0,35	0,87	1,02	1,04	1,12	1,08
1,00	0,73	1,36	0,86	1,04	1,06	1,15	1,16
3,08	1,48	1,07	0,85	1,05	1,09	1,19	1,29
5,09	1,69	0,87	0,83	1,05	1,10	1,19	1,36
9,07	1,64	1,83	0,80	1,02	1,08	1,10	1,32
11,05	1,30	0,68	0,79	0,99	1,05	1,02	1,20
13,00	0,84	0,36	0,77	0,95	1,00	0,93	1,02
15,00	0,79	0,32	0,76	0,91	0,95	0,81	0,78
17,00	0,87	0,79	0,74	0,85	0,88	0,70	0,52
19,00	0,56	0,30	0,73	0,80	0,80	0,58	0,26
21,00	0,64	0,91	0,71	0,74	0,72	0,45	0,04
23,00	0,55	0,27	0,70	0,67	0,63	0,32	-0,09

Tab. 9 Výsledná tabulka vypočtených hodnot ztrát pro V417



Graf 8 Průběh regresních křivek V417

V418

Náhrada průběhu ztrát polynomem 5. stupně:

$$P_z = 0,2344 - 0,0205 \cdot T + 0,0006 \cdot T^2 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 - 2 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 + 3 \cdot 10^{-8} \cdot T^5 \quad [7.13]$$

Náhrada průběhu ztrát polynomem 4. stupně:

$$P_z = 0,2453 - 0,0165 \cdot T + 0,0003 \cdot T^2 + 3 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 - 5 \cdot 10^{-7} \cdot T^4 \quad [7.14]$$

Náhrada průběhu ztrát polynomem 3. stupně:

$$P_z = 0,2446 - 0,0124 \cdot T + 0,0003 \cdot T^2 + 4 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 \quad [7.15]$$

Náhrada průběhu ztrát přímkou:

$$P_z = -0,0031 \cdot T + 0,2713 \quad [7.16]$$

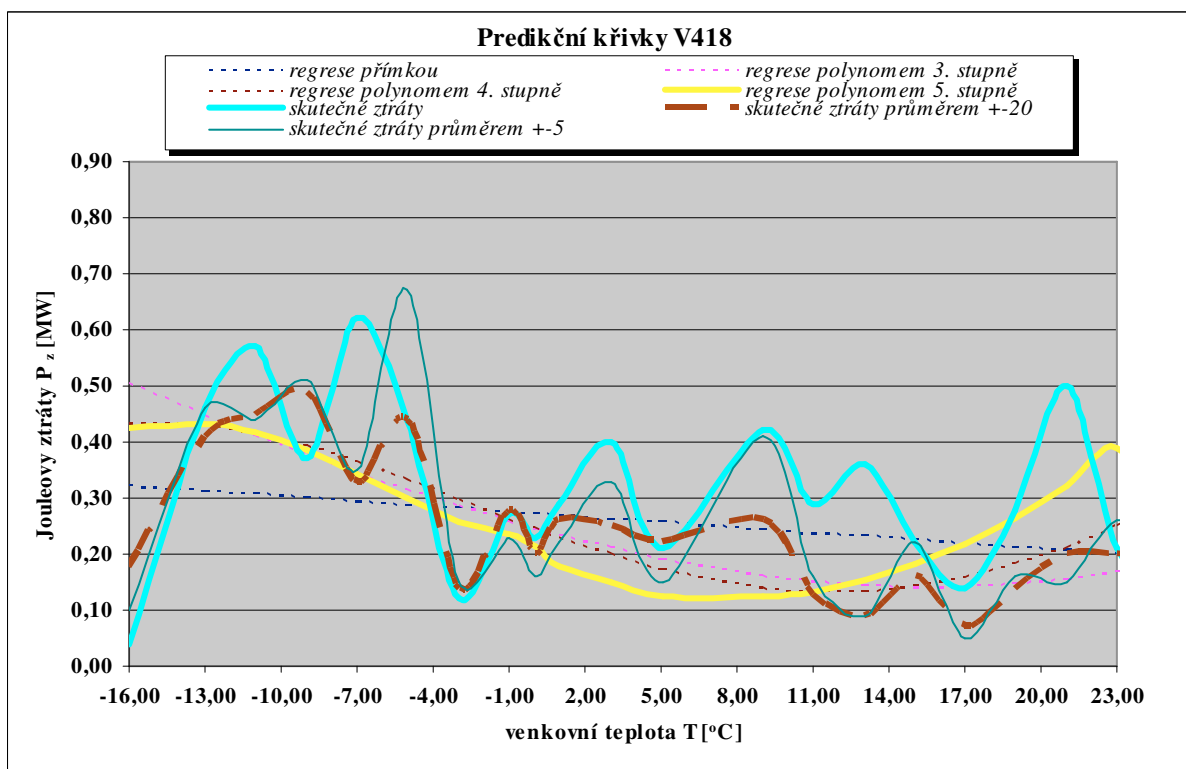
Tabulka vypočítaných ztrát V418 (tab. 10) je pro spektrum teplot je v rozmezí od $-15,99 \text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+25,02 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ve výsledném grafu pro tab. 10 jsou v legendě popsány použité regrese (graf 9). Je patrný hladký průběh ztrát pomocí polynomu 5. stupně (žlutě). Čárkovaně jsou označeny méně vhodné regrese. Při použití jedné hodnoty ztrát při zvolené teplotě (azurová) vidíme menší výkyvy, než u předchozích vedení, které oscilují kolem střední hodnoty polynomu 5. stupně. Nejvyšší rozdíly ztrát jsou při $-6,99 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $9,05 \text{ }^{\circ}\text{C}$, kdy dosahují skutečné ztráty asi dvounásobku ztrát predikovaných polynomem 5. stupně.

Při použití průměru ztrát z více hodnot, zde ± 20 hodnot od zvolené teploty (tmavá hnědá), je zřejmé zpřesnění průběhu ztrát v závislosti na teplotě.

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot ztrát V418								
Teplota	hodnoty ztrát +-20 od zadané teploty	hodnoty ztrát +-5 od zadané teploty	skutečná hodnota ztrát	přímka	polynom 3. stupně	polynom 4. stupně	polynom 5. stupně	Výsledný polynom
⁰ C	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	[MW]
-15,99	0,18	0,10	0,04	0,32	0,50	0,43	0,42	0,17
-12,99	0,41	0,46	0,46	0,31	0,45	0,43	0,43	0,39
-11,01	0,45	0,44	0,57	0,31	0,41	0,42	0,42	0,44
-9,01	0,49	0,51	0,37	0,30	0,38	0,39	0,38	0,43
-6,99	0,33	0,35	0,62	0,29	0,34	0,36	0,34	0,39
-5,00	0,44	0,67	0,44	0,29	0,31	0,33	0,30	0,35
-3,01	0,14	0,15	0,12	0,28	0,28	0,30	0,26	0,30
-1,00	0,28	0,23	0,27	0,27	0,26	0,26	0,23	0,26
0,00	0,20	0,16	0,23	0,27	0,24	0,25	0,21	0,24
1,00	0,26	0,22	0,29	0,27	0,23	0,23	0,18	0,23
3,00	0,25	0,33	0,40	0,26	0,21	0,20	0,15	0,20
5,08	0,22	0,15	0,21	0,26	0,19	0,17	0,12	0,19
9,05	0,26	0,41	0,42	0,24	0,16	0,14	0,12	0,17
11,00	0,13	0,16	0,29	0,24	0,15	0,13	0,13	0,16
13,02	0,09	0,09	0,36	0,23	0,14	0,13	0,15	0,16
15,02	0,16	0,22	0,22	0,22	0,14	0,14	0,18	0,15
17,01	0,07	0,05	0,14	0,22	0,14	0,16	0,22	0,14
19,00	0,14	0,16	0,28	0,21	0,14	0,18	0,27	0,14
21,00	0,20	0,15	0,50	0,21	0,15	0,21	0,32	0,17
23,03	0,20	0,26	0,21	0,20	0,17	0,25	0,39	0,23
25,02	0,19	0,19	0,14	0,19	0,18	0,29	0,23	0,35

Tab. 10 Výsledná tabulka vypočtených hodnot ztrát pro V418



Graf 9 Průběh regresních křivek V418

7.3 Zhodnocení výsledků

Vyvození závěrečného zhodnocení výsledků si nejlépe ukážeme výpočtem a graficky. Určíme výpočtem relativní chybu δ_x jednotlivých metod a průměr relativní chyby. Na novém listě souboru konkrétního vedení vytvoříme nové tabulky upravením stávajících (tab. 7, tab. 8, tab. 9 a tab. 10), které rozšíříme o další sloupce a řádky. Vedlejší sloupcem hodnot ztrát všech regresí bude tvořit sloupec s vyčíslenou relativní chybou mezi hodnotami skutečnými a vypočítanými. Procentní rozdíl relativních chyb bude vyčíslen pro jednotlivé hodnoty teplot. V posledním řádku provedeme výpočet průměrné relativní chyby mezi ztrátami predikovanými a skutečnými.

Vedení V251 – tab. 11, graf 10.

Vedení V253 – tab. 12, graf 11.

Vedení V417 – tab. 13, graf 12.

Vedení V418 – tab. 14, graf 13.

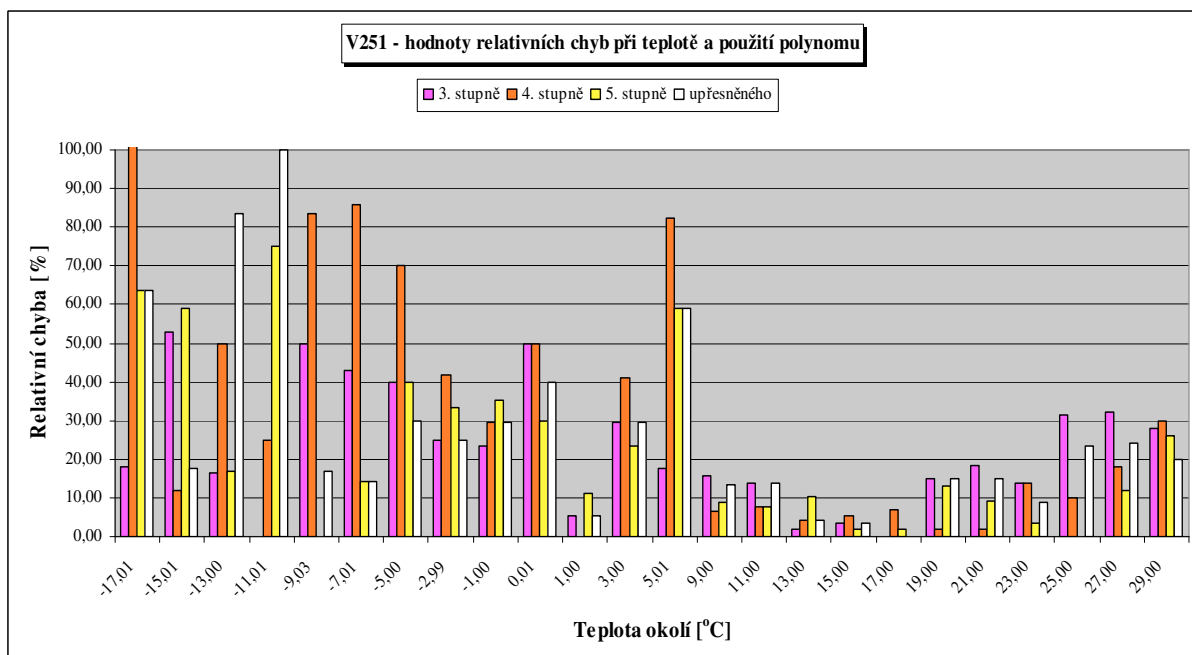
Výsledné hodnoty chyb při zvolených regresích V251

Pro vedení V251 se jeví jako nejpřesnější regrese polynomem 3. stupně, který dosahuje průměrné relativní chyby 22,73 %. Další vhodnou volbou regresní funkce je i polynom 5. stupně, který má hodnotu průměrné relativní chyby 23,13 %. Ostatní zvolené regrese jsou již nevhodné, 4. stupeň dosahuje chyby 36,53 % a výsledný upřesněný polynom 27,28 % (tab. 11).

Tabulka odchylek mezi vypočtenými a skutečnými ztrátami ± 20 hodnot V251									
Teplota	skutečné hodnoty ztrát ± 20 od zadané teploty	polynom 3. stupně	δ_x	polynom 4. stupně	δ_x	polynom 5. stupně	δ_x	výsledný polynom	δ_x
[°C]	[MW]	[MW]	[%]	[MW]	[%]	[MW]	[%]	[MW]	[%]
-17,01	0,11	0,13	18,18	0,33	200,00	0,04	63,64	0,18	63,64
-15,01	0,17	0,08	52,94	0,19	11,76	0,07	58,82	0,14	17,65
-13,00	0,06	0,05	16,67	0,09	50,00	0,07	16,67	0,11	83,33
-11,01	0,04	0,04	0,00	0,03	25,00	0,07	75,00	0,08	100,00
-9,03	0,06	0,03	50,00	0,01	83,33	0,06	0,00	0,07	16,67
-7,01	0,07	0,04	42,86	0,01	85,71	0,06	14,29	0,06	14,29
-5,00	0,10	0,06	40,00	0,03	70,00	0,06	40,00	0,07	30,00
-2,99	0,12	0,09	25,00	0,07	41,67	0,08	33,33	0,09	25,00
-1,00	0,17	0,13	23,53	0,12	29,41	0,11	35,29	0,12	29,41
0,01	0,10	0,15	50,00	0,15	50,00	0,13	30,00	0,14	40,00
1,00	0,18	0,17	5,56	0,18	0,00	0,16	11,11	0,17	5,56
3,00	0,17	0,22	29,41	0,24	41,18	0,21	23,53	0,22	29,41
5,01	0,17	0,20	17,65	0,31	82,35	0,27	58,82	0,27	58,82
9,00	0,45	0,38	15,56	0,42	6,67	0,41	8,89	0,39	13,33
11,00	0,51	0,44	13,73	0,47	7,84	0,47	7,84	0,44	13,73
13,00	0,48	0,49	2,08	0,50	4,17	0,53	10,42	0,50	4,17
15,00	0,56	0,54	3,57	0,53	5,36	0,57	1,79	0,54	3,57
17,00	0,58	0,58	0,00	0,54	6,90	0,59	1,72	0,58	0,00
19,00	0,53	0,61	15,09	0,54	1,89	0,60	13,21	0,61	15,09
21,00	0,54	0,64	18,52	0,53	1,85	0,59	9,26	0,62	14,81
23,00	0,58	0,66	13,79	0,50	13,79	0,56	3,45	0,63	8,62
25,00	0,51	0,67	31,37	0,46	9,80	0,51	0,00	0,63	23,53
27,00	0,50	0,66	32,00	0,41	18,00	0,44	12,00	0,62	24,00
29,00	0,50	0,64	28,00	0,35	30,00	0,37	26,00	0,60	20,00
	Průměr relativní chyby	-	22,73	-	36,53	-	23,13	-	27,28

Tab. 11 Výsledná tabulka vypočtených hodnot ztrát pro V251

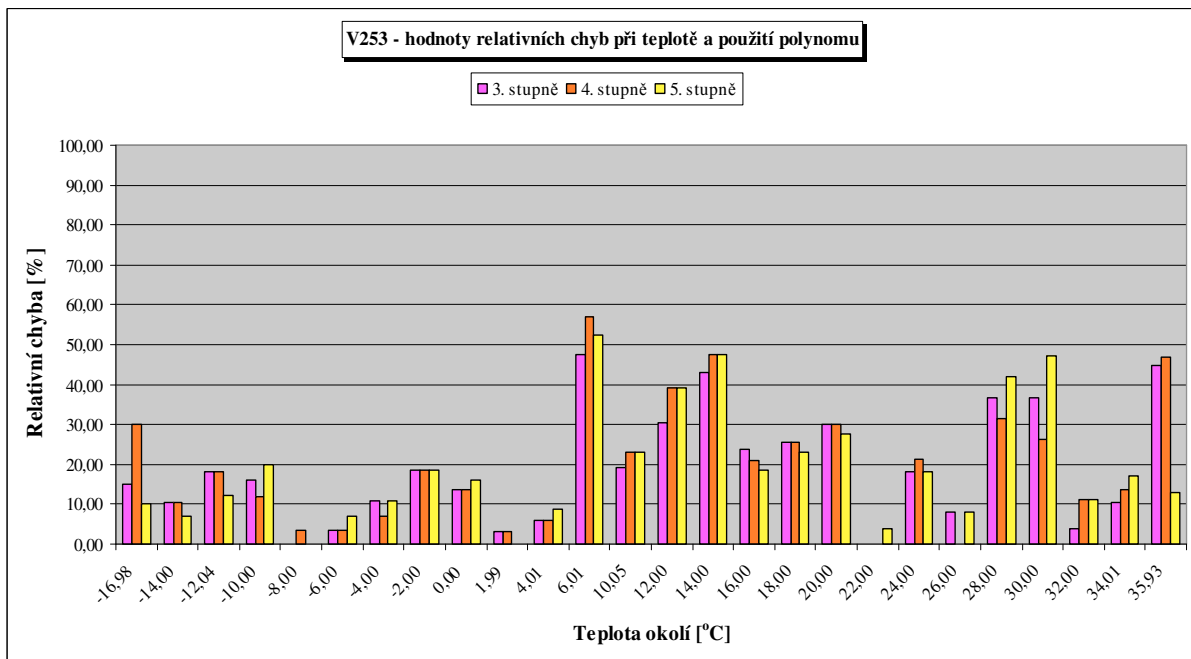
Velikost relativních chyb pro celé teplotní spektrum a jednotlivé regresní funkce jsou znázorněny barevně (graf 10) a nejmenších hodnot do 20 % dosahují mezi 9 °C a 23 °C. V rozmezí 23 °C až 29 °C dosahuje relativní chyba hodnot do 30 %. Nejméně příznivé hodnoty chyb jsou v teplotním spektru mezi -17,01 °C až 5,01 °C, kdy jsou chyby i několik desítek procent. Regrese polynomem 4. stupně (červeně) dosahuje při -5 °C hodnoty chyby 70 %.



Graf 10 Průběh regresních křivek V251

Výsledné hodnoty chyb při zvolených regresích V253

Pro vedení V253 se jeví nejpřesnější regrese polynomem 3. stupně, který vykazuje průměrnou relativní chybu 18,95 %. Dalšími vhodnými regresními funkcemi jsou i polynomy 4. a 5. stupně, které mají hodnotu průměrné relativní chyby 20,00 % a 19,30 %. Poslední a méně vhodná je regrese výsledným polynomem, která je nejméně přesná (tab. 12) a dosahuje hodnoty 38,68 %. Přesnost regresí dosahuje podobných hodnot.



Graf 11 Průběh regresních křivek V253

Tabulka odchylek mezi vypočtenými a skutečnými ztrátami ± 20 hodnot V253									
Teplota	skutečné hodnoty ztrát ± 20 od zadané teploty	polynom 3. stupně	δ_x	polynom 4. stupně	δ_x	polynom 5. stupně	δ_x	výsledný polynom	δ_x
[°C]	[MW]	[MW]	[%]	[MW]	[%]	[MW]	[%]	[MW]	[%]
-16,98	0,20	0,23	15,00	0,26	30,00	0,22	10,00	0,23	15,00
-14,00	0,29	0,26	10,34	0,26	10,34	0,27	6,90	0,31	6,90
-12,04	0,33	0,27	18,18	0,27	18,18	0,29	12,12	0,33	0,00
-10,00	0,25	0,29	16,00	0,28	12,00	0,30	20,00	0,33	32,00
-8,00	0,30	0,30	0,00	0,29	3,33	0,30	0,00	0,32	6,67
-6,00	0,29	0,30	3,45	0,30	3,45	0,31	6,90	0,31	6,90
-4,00	0,28	0,31	10,71	0,30	7,14	0,31	10,71	0,30	7,14
-2,00	0,38	0,31	18,42	0,31	18,42	0,31	18,42	0,29	23,68
0,00	0,37	0,32	13,51	0,32	13,51	0,31	16,22	0,29	21,62
1,99	0,31	0,32	3,23	0,32	3,23	0,31	0,00	0,29	6,45
4,01	0,34	0,32	5,88	0,32	5,88	0,31	8,82	0,29	14,71
6,01	0,21	0,31	47,62	0,33	57,14	0,32	52,38	0,30	42,86
10,05	0,26	0,31	19,23	0,32	23,08	0,32	23,08	0,32	23,08
12,00	0,23	0,30	30,43	0,32	39,13	0,32	39,13	0,33	43,48
14,00	0,21	0,30	42,86	0,31	47,62	0,31	47,62	0,34	61,90
16,00	0,38	0,29	23,68	0,30	21,05	0,31	18,42	0,35	7,89
18,00	0,39	0,29	25,64	0,29	25,64	0,30	23,08	0,36	7,69
20,00	0,40	0,28	30,00	0,28	30,00	0,29	27,50	0,36	10,00
22,00	0,27	0,27	0,00	0,27	0,00	0,28	3,70	0,37	37,04
24,00	0,33	0,27	18,18	0,26	21,21	0,27	18,18	0,38	15,15
26,00	0,25	0,27	8,00	0,25	0,00	0,27	8,00	0,39	56,00
28,00	0,19	0,26	36,84	0,25	31,58	0,27	42,11	0,42	121,05
30,00	0,19	0,26	36,84	0,24	26,32	0,28	47,37	0,46	142,11
32,00	0,27	0,26	3,70	0,24	11,11	0,30	11,11	0,54	100,00
34,01	0,29	0,26	10,34	0,25	13,79	0,34	17,24	0,65	124,14
35,93	0,47	0,26	44,68	0,25	46,81	0,41	12,77	0,81	72,34
	Průměr relativní chyby	-	18,95	-	20,00	-	19,30	-	38,68

Tab. 12 Výsledná tabulka vypočtených hodnot ztrát pro V253

Velikost chyb pro celé teplotní spektrum a jednotlivé regresní funkce jsou znázorněny barevně (graf 11) a nejmenších hodnot dosahují v rozmezí teplot -16,98 °C do 4,01 °C. Ostatní teploty vykazují již velké výkyvy. Nejvyšší jsou při 6,01 °C, kdy dosahují až 57 % u polynomu 4. stupně. Vedení je popsáno vhodnou rovnicí regrese a z grafu 11 jsou vidět celkově příznivější relativní chyby než u předchozího V251. Výsledný polynom není v grafu vynesena z důvodu velké hodnoty relativní chyby při 30,00 °C.

Výsledné hodnoty chyb při zvolených regresích V417

Pro vedení V417 se jeví jako nejpřesnější regrese polynomem 5. stupně, který vykazuje průměrnou relativní chybu 31,62 %. Dalším vhodnou volbou regresní funkce je i polynom 4. stupně,

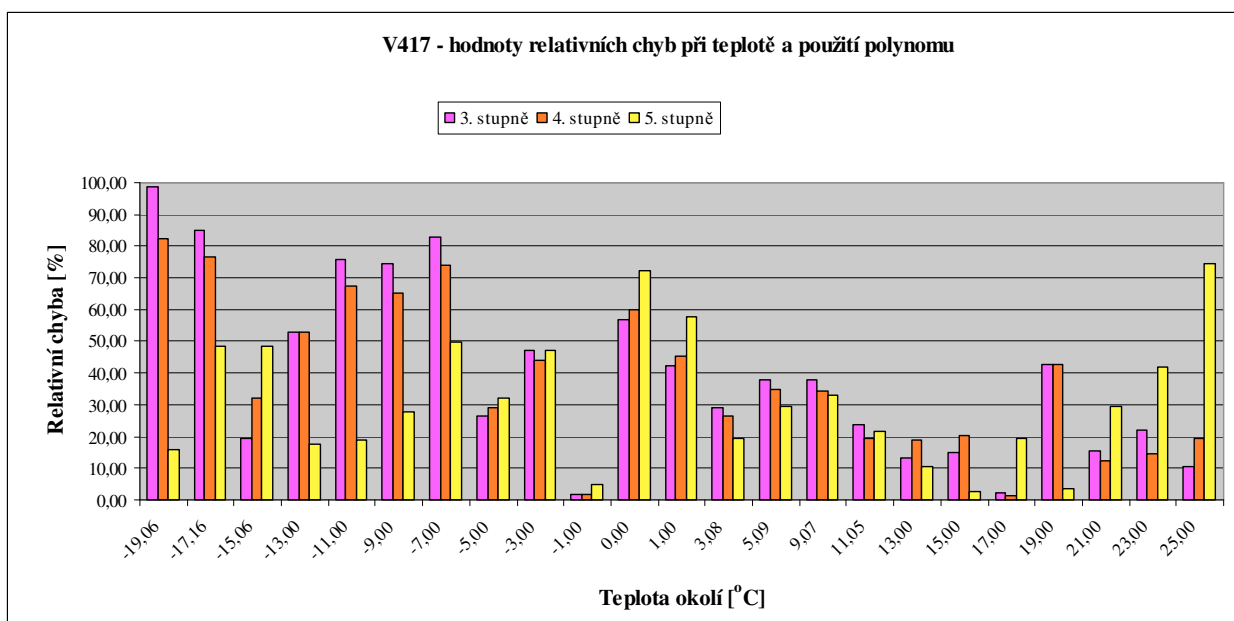
který má hodnotu průměrné relativní chyby 38,08 %. Ostatní zvolené regrese nejsou již vhodné a dosahují větších hodnot chyb, 3. stupeň dosahuje dokonce chyby 39,71 % a výsledný polynom hodnoty 41,76 % (tab. 13).

Tabulka odchylek mezi vypočtenými a skutečnými ztrátami ± 20 hodnot V417									
Teplota	skutečné hodnoty ztrát ± 20 od zadané teploty	polynom 3. stupně	δ_x	polynom 4. stupně	δ_x	polynom 5. stupně	δ_x	výsledný polynom	δ_x
$^{\circ}\text{C}$	[MW]	[MW]	[%]	[MW]	[%]	[MW]	[%]	[MW]	[%]
-19,06	1,32	0,02	98,48	0,23	82,58	1,11	15,91	1,70	28,79
-17,16	1,34	0,20	85,07	0,31	76,87	0,69	48,51	1,17	12,69
-15,06	0,31	0,37	19,35	0,41	32,26	0,46	48,39	0,76	145,16
-13,00	0,34	0,52	52,94	0,52	52,94	0,40	17,65	0,52	52,94
-11,00	0,37	0,65	75,68	0,62	67,57	0,44	18,92	0,42	13,51
-9,00	0,43	0,75	74,42	0,71	65,12	0,55	27,91	0,43	0,00
-7,00	0,46	0,84	82,61	0,80	73,91	0,69	50,00	0,51	10,87
-5,00	1,24	0,91	26,61	0,88	29,03	0,84	32,26	0,65	47,58
-3,00	0,66	0,97	46,97	0,95	43,94	0,97	46,97	0,82	24,24
-1,00	1,03	1,01	1,94	1,01	1,94	1,08	4,85	1,00	2,91
0,00	0,65	1,02	56,92	1,04	60,00	1,12	72,31	1,08	66,15
1,00	0,73	1,04	42,47	1,06	45,21	1,15	57,53	1,16	58,90
3,08	1,48	1,05	29,05	1,09	26,35	1,19	19,59	1,29	12,84
5,09	1,69	1,05	37,87	1,10	34,91	1,19	29,59	1,36	19,53
9,07	1,64	1,02	37,80	1,08	34,15	1,10	32,93	1,32	19,51
11,05	1,30	0,99	23,85	1,05	19,23	1,02	21,54	1,20	7,69
13,00	0,84	0,95	13,10	1,00	19,05	0,93	10,71	1,02	21,43
15,00	0,79	0,91	15,19	0,95	20,25	0,81	2,53	0,78	1,27
17,00	0,87	0,85	2,30	0,88	1,15	0,70	19,54	0,52	40,23
19,00	0,56	0,80	42,86	0,80	42,86	0,58	3,57	0,26	53,57
21,00	0,64	0,74	15,63	0,72	12,50	0,45	29,69	0,04	93,75
23,00	0,55	0,67	21,82	0,63	14,55	0,32	41,82	-0,09	116,36
25,00	0,67	0,60	10,45	0,54	19,40	0,17	74,63	-0,07	110,45
	Průměr relativní chyby	-	39,71	-	38,08	-	31,62	-	41,76

Tab. 13 Výsledná tabulka vypočtených hodnot ztrát pro V417

Velikost chyb pro celé teplotní spektrum a jednotlivé regresní funkce jsou znázorněny barevně (graf 12) a nejmenších hodnot dosahují v užším rozmezí teplot od 13,00 $^{\circ}\text{C}$ do 17,00 $^{\circ}\text{C}$ a také při -1,00 $^{\circ}\text{C}$. Ostatní teploty vykazují již velké výkyvy.

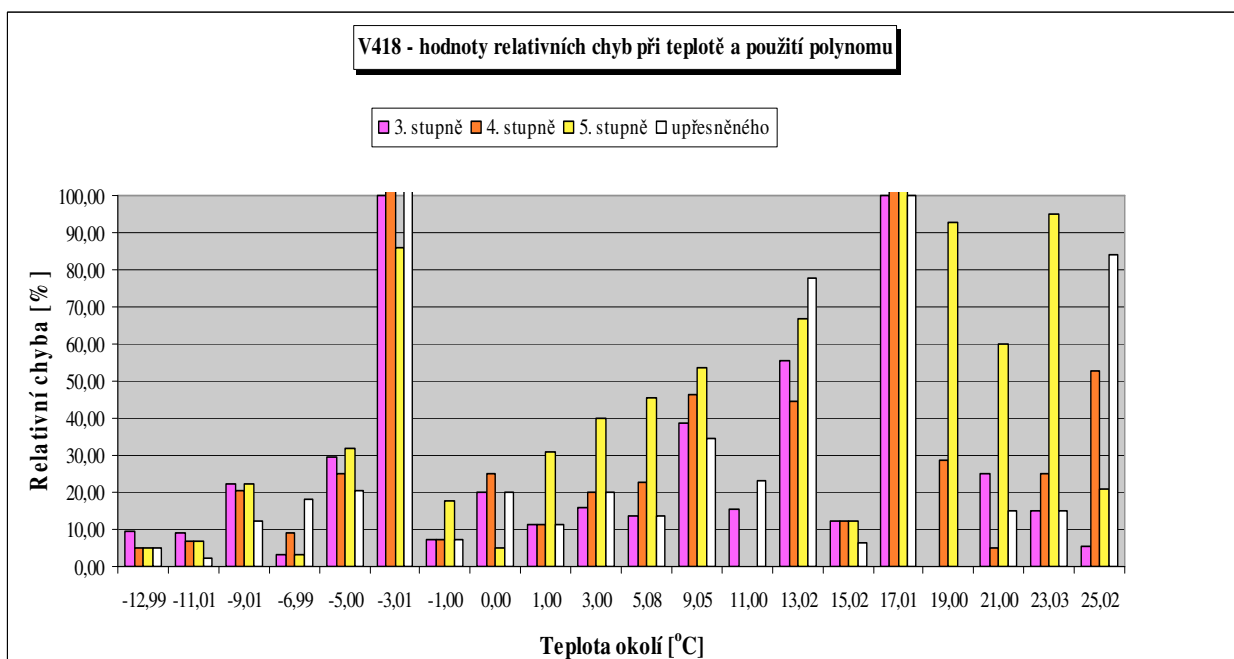
Nejvyšší jsou při hodnotách teplot od -19 $^{\circ}\text{C}$ do -7 $^{\circ}\text{C}$ a mezi 1,00 $^{\circ}\text{C}$ až 9,07 $^{\circ}\text{C}$. U hodnot chyb výsledného polynomu je vidět v tab. 13 extrém při 21,00 $^{\circ}\text{C}$, 23,00 $^{\circ}\text{C}$ a 25,00 $^{\circ}\text{C}$ a -15,06 $^{\circ}\text{C}$. Výsledný polynom není v grafu vynesena z důvodu velké hodnoty relativní chyby při -15,06 $^{\circ}\text{C}$.



Graf 12 Průběh regresních křivek V417

Výsledné hodnoty chyb při zvolených regresích V418

Pro vedení V418 se jeví jako nejpřesnější regrese polynomem 3. stupně, který dosahuje průměrné relativní chyby 25,46 %. Další vhodnou volbou regresní funkce je i výsledný polynom, který má hodnotu průměrné relativní chyby 30,03 %. Ostatní zvolené regrese jsou již velmi nevhodné, 4. stupeň dosahuje chyby 30,48 % a 5. stupeň dokonce 45,49 % (tab. 14).



Graf 13 Průběh regresních křivek V418

Tabulka odchylek mezi vypočtenými a skutečnými ztrátami +20 hodnot V418									
Teplota °C	skutečné hodnoty ztrát +20 od zadané teploty	polynom 3. stupně	δ_x	polynom 4. stupně	δ_x	polynom 5. stupně	δ_x	výsledný polynom	δ_x
	[MW]	[MW]	[%]	[MW]	[%]	[MW]	[%]	[MW]	[%]
-12,99	0,41	0,45	9,76	0,43	4,88	0,43	4,88	0,39	4,88
-11,01	0,45	0,41	8,89	0,42	6,67	0,42	6,67	0,44	2,22
-9,01	0,49	0,38	22,45	0,39	20,41	0,38	22,45	0,43	12,24
-6,99	0,33	0,34	3,03	0,36	9,09	0,34	3,03	0,39	18,18
-5,00	0,44	0,31	29,55	0,33	25,00	0,30	31,82	0,35	20,45
-3,01	0,14	0,28	100,00	0,30	114,29	0,26	85,71	0,30	114,29
-1,00	0,28	0,26	7,14	0,26	7,14	0,23	17,86	0,26	7,14
0,00	0,20	0,24	20,00	0,25	25,00	0,21	5,00	0,24	20,00
1,00	0,26	0,23	11,54	0,23	11,54	0,18	30,77	0,23	11,54
3,00	0,25	0,21	16,00	0,20	20,00	0,15	40,00	0,20	20,00
5,08	0,22	0,19	13,64	0,17	22,73	0,12	45,45	0,19	13,64
9,05	0,26	0,16	38,46	0,14	46,15	0,12	53,85	0,17	34,62
11,00	0,13	0,15	15,38	0,13	0,00	0,13	0,00	0,16	23,08
13,02	0,09	0,14	55,56	0,13	44,44	0,15	66,67	0,16	77,78
15,02	0,16	0,14	12,50	0,14	12,50	0,18	12,50	0,15	6,25
17,01	0,07	0,14	100,00	0,16	128,57	0,22	214,29	0,14	100,00
19,00	0,14	0,14	0,00	0,18	28,57	0,27	92,86	0,14	0,00
21,00	0,20	0,15	25,00	0,21	5,00	0,32	60,00	0,17	15,00
23,03	0,20	0,17	15,00	0,25	25,00	0,39	95,00	0,23	15,00
25,02	0,19	0,18	5,26	0,29	52,63	0,23	21,05	0,35	84,21
	Průměr relativní chyby	-	25,46	-	30,48	-	45,49	-	30,03

Tab. 14 Výsledná tabulka vypočtených hodnot ztrát pro V418

Velikost chyb pro celé teplotní spektrum a jednotlivé regresní funkce jsou znázorněny barevně (graf 13) a nejmenších hodnot dosahují v rozmezích teplot od -12,99 °C do -5,00 °C a také kolem 11,00 °C. Ostatní teploty vykazují již velké rozdíly. Nejvyšší jsou při hodnotách teplot -3,01 °C a 17,01 °C.

8 Možnosti využití predikcí technických ztrát v praxi

Při toku elektrické energie z místa napájení do místa spotřeby dochází ke ztrátám vždy. Naším úkolem bylo stanovit matematické vyjádření závislostí pro výpočet činných ztrát v závislosti na teplotě, které by mohlo být užito k jejich predikci. Byly nalezeny predikční modely pro všechna vedení přenosové soustavy České republiky mimo vedení uvedená v kapitolách 5.5 a 5.6. Při znalosti predikce teplot v České republice je možné využít nalezené závislosti pro určení předpokládaných technických ztrát při ustáleném provozu přenosové soustavy. Každé vedení má svou specifickou regresní funkci, která je jedinečná, určená způsobem zapojení soustavy a přenášeným výkonem.

Předpověď technických ztrát v závislosti na teplotě okolí je možné využít pro efektivnější řízení provozu sítí přenosové soustavy a elektráren. Celý výkon vyrobený ve velkých zdrojích je přenášen přenosovou soustavou a zahrnuje i ztráty. Při znalosti předpovědi venkovních teplot je možné ztráty určit v předstihu a plánovat tak lépe připravenost zdrojů k objemu výroby elektrické energie. Zlepšit se může i příprava provozu plánováním nejlepší konfigurace přenosové soustavy, která bude mít při plánovaných odstávkách menší ztráty lepším využitím jednotlivých vedení. Vedení by bylo zatěžováno tak, aby se způsob jeho provozu blížil co nejvíce ideálnímu. Nejlepším stavem je provozování vedení zatíženého přirozeným výkonem.

Určení velikosti ztrát pro konkrétní vedení je možná řešit výpočtem v Microsoft Excel. Práce s tímto programem je neautomatická a zadávání teplot manuálně má vždy subjektivní negativní vlivy. Tyto mohou být ze strany odpovědného zaměstnance způsobeny nepřítomností v práci z důvodů nemoci, nebo konáním jiné zaměstnanecké práce a nemožností data aktualizovat. Rovněž sdílení dat prognóz ztrát je nespolehlivé při využití univerzálních softwarových systémů PC. Proto se nabízí prostor tuto činnost zautomatizovat a pro sdílení zajistit vyšší stupeň spolehlivosti.

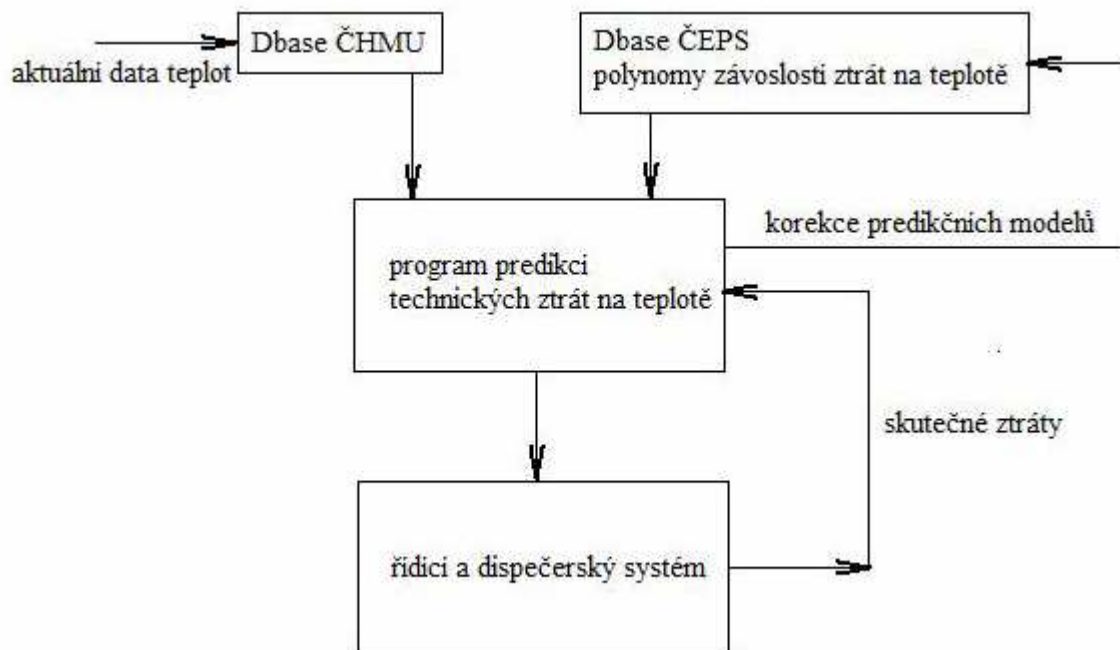
Automatizaci odhadu velikosti ztrát je možno řešit specializovaným autonomním výpočetním programem, který bude ztráty dopočítávat na základě čerstvých dat z Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ), který prognózami teplot disponuje a provádí jejich aktualizaci. ČHMÚ by se mohlo podílet na dalším vývoji automatizace předpovědi technických ztrát poskytnutím svých dat teplot z různých částí České republiky. Vyšší stupeň spolehlivosti přístupu dat pro dispečink a plánování provozu by spočíval v začlenění softwaru pro určení ztrát mezi běžně používané podpůrné pomůcky při zajištění chodu programu na úrovni řídicího systému. Data by byla načtena a aktualizována každým spuštěním programu.

Prognóza technických ztrát může poté být zahrnuta k předpokládanému zatížení a vyhodnocena její přesnost v praxi.

8.1 Odborný software

Závěrem kapitoly 8 je popsán možný další vývoj využití predikce pro automatizovaný výpočet. Při řešení úkolu této diplomové práce byly ukázány postupy, jak lze vytvořit a matematicky popsat závislost technických ztrát na teplotě okolí. Matematickým popisem lze dopočítat pro libovolnou teplotu hodnotu velikosti ztrát pro všechna zpracovaná vedení přenosové soustavy. Pro jejich vyčíslení by bylo vhodné vytvořit speciální aplikaci, která by spočítala na základě predikce teplot očekávanou hodnotu ztrát.

Zadáním příslušné polynomické závislosti do programu by mohla být zpracovávat aktuální data předpovědi teplot automatizovaně z ČHMÚ. Program by měl návaznost na řídicí systém a zde by



Obr. 20 Blokové schéma funkce vyhodnocování predikcí

došlo k vyhodnocení skutečných ztrát vůči predikovaným. Zpětnou vazbou by program predikce ztrát vyhodnotil svou přesnost. Na základě těchto dat by se provedla automatická korekce polynomu tak, aby se zpřesnil. Poté dojde k uložení do databáze polynomů daného vedení pro dané období. Po určité době, s přibývajícými zpřesněními, se dá upřesnit očekávané množství ztrát.

9 Závěr

Cílem diplomové práce je snaha nalezení matematického popisu závislosti ztrát na okolní teplotě vedení pro možnost predikce činných ztrát přenosových vedení České republiky. Úvodní část tvoří popis přenosové soustavy včetně její funkce. Pro bližší pochopení činnosti soustavy jsou popsány a uvedeny příklady jejich základních prvků, které se v ní uplatňují a mají ve všech objektech stejnou funkci. Rovněž jsou naznačeny a přiblíženy jejich konkrétní úlohy v elektrizační soustavě.

Další kapitola se zaměřuje na teorii vedení. Popsané jsou zde parametry vedení, náhled na jejich užití při výpočtech a základní náhradní schémata. Zmiňujeme zvláštnosti provozování dlouhých vedení.

Úvod kapitoly o teorii ztrát elektrické energie se věnuje popisu členění a vzniku činných ztrát na vedení, mezi které řadíme ztráty Jouleovy, ztráty korónou a ztráty svodem. Objasněna je jejich příčina, vznik a uvedení základních vzorců pro jejich výpočet.

Dalším pokračováním textu stanovujeme vhodné matematické popisy závislosti ztrát na teplotě a zabýváme se vybranými statistickými metodami, potřebnými pro určení matematických popisů hledané závislosti. Při zpracování velkého množství dat se uvažuje použití nejjednodušších rovnic, které jsou jednoduše vyčíslitelné, dostatečně přesné pro výpočet ztrát a blíží se přesnému proložení skutečných průběhů technických ztrát.

Následující text se věnuje popisu postupu přípravy a zpracování dat poskytnutých společností ČEPS. Zpracováno je téměř jedno sto kusů vedení přenosové soustavy a vyhotoveny příslušné grafy s vygenerováním polynomů 5. stupně pomocí Microsoft Excel. Při zpracování dat je zjištěna neúplnost databáze činných ztrát pro obě napěťové hladiny. Pro napětí 400 kV u vedení V051, V052, V457, pro napětí 220 kV u V001, V002, V011, V017 a V018. Tato vedení nejsou zpracována.

Obsahem následující části textu je pro náhodně zvolené vedení V418 ukázka několika možných regresí. V příkladu jsou použity popisy průběhu ztrát pomocí přímkové závislosti a polynomů 3., 4. a 5. stupně. Je z nich patrné, že pro toto vedení nejvěrohodněji popisuje závislost ztrát na teplotě polynom 5. stupně. Pro konkrétní vedení V418 je optimální volbou mezi přesností a náročností výpočtu.

Pro porovnání predikovaných a skutečných hodnot činných ztrát jsou volena z obou napěťových hladin vždy dvě vedení. Pro napětí 400 kV jsou volena V417, V418 a pro 220 kV vedení V251 a V253. Vedení mají vygenerovány regresní funkce přímkami a polynomy 3. a 4. stupně. Jsou zde prezentovány rovnice polynomů zvolených stupňů s ukázkou průběhu predikovaných ztrát v grafech. Vytvořením tabulky se skutečnými a predikovanými ztrátami můžeme zhodnotit věrohodnost jednotlivých regresních funkcí. Závěrem této kapitoly je provedeno vyhodnocení. Vycházíme z vypočítaných relativních chyb uvedených v tab. 11 až tab.14, z kterých plyne přesnost zvolené regresní funkce. Zjištěné skutečnosti ukazují, že je nutné ke každému vedení přistoupit individuálně. Nelze obecně konstatovat, která regrese je vhodná globálně pro všechna vedení. Jak vidíme z grafů v kapitole 7, nelze ani z hlediska zkoumané napěťové hladiny prohlásit, který polynom je pro ni nejlepší regresí. Zde se otevírá další prostor pro zkoumání optimálních závislostí dalších vedení. Může se u nich potvrdit, že nejlepší regresní funkcí je zmiňovaný polynom 5. stupně, ale nyní to nejde ani vyvrátit.

V kapitole 8 je naznačena možnost využití predikce technických ztrát v praxi. Uvedeno je i blokové schéma funkce vyhodnocování predikcí pomocí specializovaného programu. Přínosem využití predikce technických ztrát je možnost zvýšit účinnost přenosu a snížit náklady provozování vedení přenosové soustavy.

Závěrem je nutno podotknout, že v celé práci se závislost ztrát řeší nezávisle na velikosti zatížení jednotlivých vedení. Předpokladem pro toto zjednodušení je stálost zatížení a jeho opakování. Jedná se tedy o určitou periodicitu zatížení, která může mít vliv na objektivnost posuzování rozdílů mezi skutečnými a predikovanými ztrátami. Zatížení vedení a velikost toků výkonů vedeními by měli být v dalším zkoumání problematiky zohledněny. Řešení ztrát by tak dostalo nový rozměr, kterým by byla velikost zatěžovacího proudu procházejícího sledovaným vedením.

Určení velikosti ztrát regresní funkcí je v práci stanoveno pro určité teplotní spektrum obvyklé v našich zeměpisných šířkách. Predikce dosahuje přesnosti s drobnými výkyvy v extrémech teplot. Přesnost měřidel pro měření teplot okolí v jednotlivých stanicích má rovněž nepříznivý vliv při zkoumání hledaných závislostí. Pro objektivnější posouzení by bylo vhodné umístit teplotní čidla stejných parametrů přesnosti na všech objektech přenosové soustavy.

Přílohu 2 tvoří vygenerované výsledné polynomicke závislosti technických ztrát s ohledem na venkovní teplotu, které byly jedním z hlavních bodů diplomové práce. Součástí práce jsou i přílohy 3 a 4 s exporty syrových dat ztrát a teplot z databáze ČEPS. V přílohách 5 a 6 jsou zpracované upravené tabulky s grafy pro vedení přenosové soustavy České republiky.

Všechna data a text diplomové práce jsou uložena na paměťovém médii CD-ROM přiloženém.

Seznam literatury a odkazů internetu

- [1] **Hradílek, Z.:** *Elektroenergetika*, skriptum VŠB-TU Ostrava 1992
- [2] **Rusek, S.:** *Teoretická elektroenergetika*, skriptum VŠB-TU Ostrava 1984
- [3] **Rudolf, L.:** *Komplexní rozbor elektrických ztrát vedení přenosové soustavy*, teze habilitační práce, VŠB TU Ostrava 2009
- [4] **Hodinka, M.:** *Elektrické sítě I*, skriptum VŠB v Ostravě 1973
- [5] **Mach, V.:** *Technika vysokého napětí*, skriptum VŠB-TU Ostrava 2001
- [6] **Santarius, P.:** *Elektrické stanice a vedení*, skriptum VŠB-TU Ostrava 1990
- [7] **Santarius, P.:** *Elektroenergetika I*, skriptum VŠB-TU Ostrava 1984
- [8] http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:PowerStation_cs.svg
- [9] http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Hydroelectric_dam.png
- [10] **Hradílek, Z.:** *Elektroenergetika distribučních a průmyslových sítí*, odborná publikace, VŠB-TU Ostrava 2008
- [11] EnergyWeb, *Elektrizační soustavy* [online], Simopt, [citace 29. 03. 2011]
http://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=1&ee_chapter=5.3.2
- [12] ČEPS, a. s.: *Exporty databází měření teplot a technických ztrát*
- [13] ČEPS, a. s.: *Dispečerské řízení ČEPS, a. s.* [online], ČEPS a. s. 2010, [citace 29.3.2011]
http://www.ceps.cz/doc/soubory/20100610/Brozura_Dispecink_2010_web.pdf
- [14] TIS CZ-Citrix XenApp Plugins for Hosted Apps, Technický informační systém společnosti ČEZ Distribuce, a.s.
- [15] ČEPS, a. s.: *Výroční zpráva 2009* [online], [citace 28.10.2010],
http://www.ceps.cz/doc/soubory/20100514/CEPS_Vyrocní_zprava_%202009.pdf
- [16] **Vladař, J., Zelenka, J.:** *Elektrotechnika a silnoproudá elektronika*, odborná publikace, SNTL, ALFA, 1986
- [17] **Székel, J., Neveselý, M.:** *Teoretická elektrotechnika I*, skriptum VŠDS Žilina, SNTL, ALFA, 1984
- [18] **Székel, J., Neveselý, M.:** *Teoretická elektrotechnika II*, skriptum VŠDS Žilina, SNTL, ALFA, 1984
- [19] **Rudolf, L.:** *Komplexní rozbor elektrických ztrát vedení přenosové soustavy*, habilitační práce, VŠB TU Ostrava, FEI, 2009
- [20] **Rudolf, L.:** *Závislost elektrických ztrát vedení přenosové soustavy na atmosférických vlivech*, disertační práce, VŠB TU Ostrava, FEI, 2003
- [21] **Trojánek, Z.:** *Řízení elektrizačních soustav*, skriptum ČVUT v Praze, Editacní středisko ČVUT, 1985
- [22] Příspěvatelé Wikipedie, *Přenosová soustava* [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, datum poslední revize 2. 3. 2011, [citováno 31. 3. 2011],
http://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%99enosov%C3%A1_soustava
- [23] **Hodinka, M.:** *Elektrické sítě II*, skriptum VŠB v Ostravě 1976
- [24] **Hodinka, M., Fecko, Š., Němeček, F.:** *Přenos a rozvod elektrické energie*, odborná publikace, SNTL, ALFA, 1989, ISBN 80-03-00065-3
- [25] **Mikulčák, J., Krkavec, L.:** *Matematické, fyzikální a chemické tabulky*, SPN, 1987, publikace č.54-09-11/15

Seznam příloh

Příloha 1: Seznam zkratk objektů dle SJZ

Příloha 2: Soupis výsledných polynomů 5. stupně pro vedení nadřazené soustavy

Příloha 3: Export databází teplot a technických ztrát pro vedení 220kV (CD - příloha)

Příloha 4: Export databází teplot a technických ztrát pro vedení 400kV (CD - příloha)

Příloha 5: Výsledné tabulky pro regrese vedení 220 kV (CD - příloha)

Příloha 6: Výsledné tabulky pro regrese vedení 400 kV (CD - příloha)

Příloha 7: Schéma distribučních a přenosových sítí ČR (CD - příloha)

Příloha 8: CD elektronická verze DP